



Luís Filipe Correia Nascimento

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Contributo para adaptação do projeto de ferramentas de estampagem para peças em aço DP

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado,
FCT-UNL

Coorientador: Vitor Manuel Ramalho Pereira, Mestre em Engenharia Mecânica,
APAL - Cunhos e Cortantes Lda.

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Manuel Vicente Fradinho,
Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguentes: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, FCT-UNL

Vogais: Professor Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2017

Contributo para adaptação do projeto de ferramentas de estampagem para peças em aço DP

Copyright © Luís Filipe Correia Nascimento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Para a minha família, amigos e namorada

Que sempre me apoiaram

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao DEMI da FCT/UNL e a todos os seus professores que, de uma forma ou de outra, contribuíram e me ajudaram na minha formação e a chegar a esta fase tão importante da minha vida – o fecho do ciclo académico e o início da vida profissional. Um especial agradecimento ao professor António Mourão por toda ajuda e, essencialmente, por toda a paciência que teve ao longo do desenvolvimento de toda esta dissertação. Outro agradecimento, vai para o Engenheiro Vitor Pereira, também formado nesta instituição, por todo o apoio dado e por tudo o que me ensinou. Sem eles, este trabalho não seria possível.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer a todos os meus colegas de curso, seja pelas noites passadas em branco a estudar para um teste ou exame ou mesmo a acabar trabalhos que teriam de ser entregues no dia seguinte. Todos eles, que sabem bem quem são, me ajudaram a superar momentos stressantes e de bastante cansaço, às vezes, apenas com uma simples risada. Por tudo isto, um muito obrigado a todos vós. Por tudo aquilo que significam (e eles sabem bem), não poderia deixar terminar estes agradecimentos sem um especial obrigado aos colegas Daniel Costa, Diogo Mendes e José Almeida. Vocês são como família!

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus pais, à minha irmã, aos avós, aos tios, aos primos e à minha namorada, Alexandra Amaral, e aos meus bons amigos de fora da faculdade (mas nunca menos importantes!) por todo o apoio e incentivo que me foi dado, não só nestes últimos 5 anos, mas ao longo de toda a minha vida. Nunca me faltou nada e se há alguém a quem devo tudo, é a eles. Um muito obrigado a todos!

Resumo

Nas últimas décadas, tem havido um esforço pela parte da indústria automóvel em reduzir o peso dos veículos produzidos. Uma das soluções adotadas passa pela utilização de aços de alta resistência, como é o caso dos aços DP, pelo facto de permitirem a redução de espessura de chapa utilizada não comprometendo as tarefas a desempenhar pelos componentes.

Um dos principais problemas enfrentados ao utilizar estes aços é o fenómeno de retorno elástico que ocorre na chapa após esta passar pelo processo de estampagem que é muito mais acentuado do que nos aços convencionalmente utilizados na indústria. Este efeito provoca alterações geométricas nos componentes que podem comprometer o seu correto funcionamento.

Uma das formas de reverter o retorno elástico, passa pela compensação das ferramentas. Sendo o processo de compensação essencialmente iterativo, já existem *softwares* no mercado capazes de auxiliar os fabricantes de ferramentas no processo inicial. Através de simulação, é possível obter valores fiáveis de retorno elástico que depois são utilizados para uma realização de iterações de compensação, de modo a chegar a resultados mais satisfatórios.

O foco do trabalho desta dissertação é a utilização de um destes *softwares* para que possa ser feita a compensação geométrica de uma ferramenta (respeitante ao caso de estudo) de maneira a que as alterações efetuadas conduzam à geometria da ferramenta que leva à anulação do retorno elástico.

Palavras-chave: Aços DP; Projeto de ferramentas de estampagem; Retorno elástico; Compensação de ferramentas

Abstract

In recent decades, there has been an effort by the automotive industry to reduce the weight of vehicles produced. One of the adopted solutions is the use of high strength steels, as is the case of DP steels, because they allow the reduction of sheet thickness used without compromising the tasks to be performed by the components.

One of the main problems faced in using these steels is the springback phenomenon that occurs in the sheet after it passes through the stamping process (in this case, it is the category in which most of the manufacturing processes involving these steels are inserted), which is much steeper than in conventionally used steels in the industry. This effect causes geometric changes on the components that may compromise their correct operation.

One way to reverse springback is through the compensation of the tools. Since the compensation process is essentially iterative, fortunately, there are already some softwares in the market that are capable to assist tool manufacturers in the initial process. Through simulation, it is possible to obtain reliable values of springback that are then used to perform compensation iterations in order to arrive at more satisfactory results.

The focus of the work performed in this dissertation is to use one of these softwares so that a tool can be compensated (regarding the case study) in order that the verified changes can lead to the tool geometry that will eliminate the springback.

Keywords: DP steels; Stamping tools design; Springback; Tool compensation

Índice de conteúdos

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice de conteúdos.....	ix
Índice de figuras.....	xi
Índice de tabelas.....	xvi
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodologia abordada	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2 Novos aços na indústria automóvel	5
2.1 Aços avançados de alta resistência (AHSS)	5
2.2 Aços DP.....	7
3 Considerações sobre estampagem	11
3.1 Fatores influentes na estampagem	11
3.2 Dificuldades em estampar aços DP	12
3.3 Retorno elástico	12
3.3.1 Retorno elástico nos aços DP	12
3.3.2 Defeitos mais comuns provenientes do retorno elástico	15
3.3.3 Redução do retorno elástico	17
3.3.3.1 Variáveis influentes no retorno elástico	17
3.3.3.2 Previsão do retorno elástico e compensação de ferramentas	18
3.4 Efeito de <i>Bauschinger</i>	19

4 Breve análise da funcionalidade do <i>software</i>	21
4.1 Introdução	21
4.1.1 Peça selecionada	21
4.1.2 Sequência de operação	22
4.1.3 Materiais utilizados	23
4.1.4 Efeitos do material no retorno elástico	24
4.2 Efeitos dos parâmetros de operação no retorno elástico	26
4.2.1 Introdução	26
4.2.2 Parâmetros considerados	27
4.2.2.1 Tribologia	27
4.2.2.2 Espaço entre cunho e matriz (<i>offset</i>)	31
4.2.2.3 Raio de curvatura das dobras da peça	34
5 Caso de estudo	39
5.1 Peça selecionada e guiamento da chapa na estampagem	39
5.2 Análise dos desvios geométricos provocados pelo retorno elástico no aço DP780	41
5.3 Compensação da ferramenta	45
5.3.1 Parâmetros usados na compensação da ferramenta	49
5.3.2 Primeira fase de iterações de compensação	52
5.3.3 Segunda fase de iterações de compensação	59
5.3.4 Terceira fase de iterações de compensação	64
6 Análise dos resultados obtidos	71
6.1 Introdução	71
6.2 Ferramenta com geometria nominal da peça	71
6.3 Ferramenta com geometria obtida na Iteração 3	72
6.4 Ferramenta com geometria obtida na Iteração 4	73
7 Conclusão	77
Referências bibliográficas	79

Índice de figuras

Figura 1.1 Componentes estruturais de automóvel obtidos por estampagem [1].....	1
Figura 1.2 Fluxograma da metodologia abordada na dissertação	3
Figura 2.1 Comparação entre aços convencionais e AHSS relativamente à extensão e à tensão limite de elasticidade [3]	6
Figura 2.2 Comparação entre aços convencionais e AHSS relativamente à extensão e à tensão de rotura [3].....	6
Figura 2.3 Microestrutura de um aço DP (Adaptado de [6] e [7])	8
Figura 2.4 Comparação de várias curvas tensão-extensão de aços DP e de um aço macio [6]	9
Figura 2.5 Comparação de curvas de enformabilidade de vários aços DP	9
Figura 2.6 Comparação de estampagem profunda de aços DC04, DP600 e DP1000 (Adaptado de [12])	10
Figura 2.7 Comparação de estampagem por expansão de aços DC04, DP600 e DP1000 (Adaptado de [12])	10
Figura 3.1 Comparação do retorno elástico em duas peças (à esquerda em aço DP e à direita em aço tradicionalmente utilizado) produzidas pela mesma ferramenta (Adaptado de [6])	13
Figura 3.2 Comparação esquemática da alteração angular (devida ao retorno elástico) e a ocorrência do empeno mais acentuado na produção de peças em aço DP e em aço convencional [6]	13
Figura 3.3 Comparação do retorno elástico entre um aço avançado de alta resistência e um aço macio através das curvas de tensão-extensão [14]	14
Figura 3.4 Comparação de retorno elástico entre um aço DP 600 e um DP 1000 [16]	15
Figura 3.5 Diferença entre o retorno elástico de um aço DP 350/600 e DP 700/1000 evidenciado nas curvas tensão-extensão (Adaptado de [6])	15
Figura 3.6 Variáveis influentes no fenómeno de retorno elástico [19]	17
Figura 3.7 Representação esquemática do efeito de <i>Bauschinger</i> (Adaptado de [20])	20
Figura 4.1 Dobra utilizada para adaptação ao <i>software</i>	21
Figura 4.2 Representação esquemática da força do cerra-chapa (Adaptado de [21])	22
Figura 4.3 Representação esquemática do processo de estampagem utilizado na fase de adaptação do <i>software</i>	23

Figura 4.4 Exemplo explicativo da escala de cores do <i>software</i>	24
Figura 4.5 Análise da funcionalidade do <i>software</i> : <i>output</i> para aço DC06.....	25
Figura 4.6 Análise da funcionalidade do <i>software</i> : <i>output</i> para aço DP980	25
Figura 4.7 Peça utilizada na fase de variação de parâmetros	27
Figura 4.8 Variação do perfil tribológico– estampagem de aço DC06 com perfil <i>PreLube Enhanced</i> (pior resultado)	28
Figura 4.9 Variação do perfil tribológico - estampagem de aço DC06 com perfil <i>Mill Oil</i> (melhor resultado)	29
Figura 4.10 Variação do perfil tribológico – estampagem de aço DP980 com perfil <i>Blank Wash</i> (pior resultado)	30
Figura 4.11 Variação do perfil tribológico – estampagem de aço DP980 com perfil <i>PreLube Enhanced</i> (melhor resultado)	30
Figura 4.12 Variação do <i>offset</i> da ferramenta – estampagem de aço DC06 com <i>clearance</i> de 0,06 mm (<i>offset</i> = 0,76 mm) (pior resultado)	32
Figura 4.13 Variação do <i>offset</i> da ferramenta – estampagem de aço DC06 com <i>clearance</i> nula (<i>offset</i> = 0,7 mm) (melhor resultado)	32
Figura 4.14 Variação do <i>offset</i> da ferramenta – estampagem de aço DP980 com <i>clearance</i> de 0,01 mm (<i>offset</i> = 0,71 mm) (pior resultado)	33
Figura 4.15 Variação do <i>offset</i> da ferramenta – estampagem de aço DP980 com <i>clearance</i> de 0,03 mm (<i>offset</i> = 0,73 mm) (melhor resultado)	34
Figura 4.16 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DC06 com raios de 5 mm (pior resultado)	35
Figura 4.17 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DC06 com raios de 0,7 mm (melhor resultado)	36
Figura 4.18 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DP980 com raios de 1 mm (pior resultado)	37
Figura 4.19 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DP980 com raios de 4 mm (melhor resultado)	37
Figura 5.1 Peça estudada na dissertação	39
Figura 5.2 Forma da chapa prévia ao processo de estampagem	40
Figura 5.3 Representação esquemática do processo de estampagem do caso de estudo da dissertação	40
Figura 5.4 Ferramenta progressiva de produção da peça do caso de estudo	41

Figura 5.5 Fita completa da peça do caso de estudo	41
Figura 5.6 Seccionamento da peça do caso de estudo.....	42
Figura 5.7 Representação esquemática do defeito na curvatura longitudinal da peça do caso de estudo	42
Figura 5.8 Secção $y = 500$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	43
Figura 5.9 Secção $y = 400$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	43
Figura 5.10 Secção $y = 300$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	44
Figura 5.11 Secção $y = 200$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	44
Figura 5.12 Secção $y = 100$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	44
Figura 5.13 Secção $y = 0$ mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação	45
Figura 5.14 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta igual à geometria pretendida ..	46
Figura 5.15 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 500$ mm.....	47
Figura 5.16 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 400$ mm.....	47
Figura 5.17 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 300$ mm.....	47
Figura 5.18 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 200$ mm.....	47
Figura 5.19 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 100$ mm.....	48
Figura 5.20 Caso de estudo - Geometria inicial: secção $y = 0$ mm.....	48
Figura 5.21 Representação esquemática do módulo de compensação do programa de simulação	48
Figura 5.22 Efeito do parâmetro <i>smoothing control</i> na compensação de ferramentas	50
Figura 5.23 Representação esquemática do processo iterativo de compensação da ferramenta .	51
Figura 5.24 1ª fase de iterações de compensação - Secção $y = 500$ mm.....	53
Figura 5.25 1ª fase de iterações de compensação - Secção $y = 400$ mm.....	54
Figura 5.26 1ª fase de iterações de compensação - Secção $y = 300$ mm.....	54
Figura 5.27 1ª fase de iterações de compensação - Secção $y = 200$ mm.....	54
Figura 5.28 1ª fase de iterações de compensação - Secção $y = 100$ mm.....	54

Figura 5.29 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm.....	54
Figura 5.30 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 1.....	55
Figura 5.31 Iteração de compensação 1: Secção y = 500 mm	55
Figura 5.32 Iteração de compensação 1: Secção y = 400 mm	56
Figura 5.33 Iteração de compensação 1: Secção y = 300 mm	56
Figura 5.34 Iteração de compensação 1: Secção y = 200 mm	56
Figura 5.35 Iteração de compensação 1: Secção y = 100 mm	56
Figura 5.36 Iteração de compensação 1: Secção y = 0 mm	57
Figura 5.37 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 2.....	57
Figura 5.38 Iteração de compensação 2: Secção y = 500 mm	57
Figura 5.39 Iteração de compensação 2: Secção y = 400 mm	58
Figura 5.40 Iteração de compensação 2: Secção y = 300 mm	58
Figura 5.41 Iteração de compensação 2: Secção y = 200 mm	58
Figura 5.42 Iteração de compensação 2: Secção y = 100 mm	58
Figura 5.43 Iteração de compensação 2: Secção y = 0 mm	59
Figura 5.44 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 500 mm.....	61
Figura 5.45 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 400 mm.....	61
Figura 5.46 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 300 mm.....	61
Figura 5.47 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 200 mm.....	61
Figura 5.48 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 100 mm.....	61
Figura 5.49 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm.....	62
Figura 5.50 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 3.....	62
Figura 5.51 Iteração de compensação 3: Secção y = 500 mm	62
Figura 5.52 Iteração de compensação 3: Secção y = 400 mm	63
Figura 5.53 Iteração de compensação 3: Secção y = 300 mm	63
Figura 5.54 Iteração de compensação 3: Secção y = 200 mm	63
Figura 5.55 Iteração de compensação 3: Secção y = 100 mm	63
Figura 5.56 Iteração de compensação 3: Secção y = 0 mm	64
Figura 5.57 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 500 mm.....	65
Figura 5.58 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 400 mm.....	66

Figura 5.59 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 300 mm.....	66
Figura 5.60 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 200 mm.....	66
Figura 5.61 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 100 mm.....	66
Figura 5.62 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm.....	66
Figura 5.63 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 4.....	67
Figura 5.64 Iteração de compensação 4: Secção y = 500 mm	67
Figura 5.65 Iteração de compensação 4: Secção y = 400 mm	67
Figura 5.66 Iteração de compensação 4: Secção y = 300 mm	68
Figura 5.67 Iteração de compensação 4: Secção y = 200 mm	68
Figura 5.68 Iteração de compensação 4: Secção y = 100 mm	68
Figura 5.69 Iteração de compensação 4: Secção y = 0 mm	68
Figura 6.1 Pormenores geométricos da geometria nominal	71
Figura 6.2 Peça produzida pela ferramenta de geometria nominal: Secção y = 500 mm	71
Figura 6.3 Pormenores geométricos da geometria da Iteração 3	73
Figura 6.4 Peça produzida pela ferramenta da Iteração 3: Secção y = 500 mm	73
Figura 6.5 Pormenores geométricos da geometria da Iteração 4	75
Figura 6.6 Peça produzida pela ferramenta da Iteração 4: Secção y = 500 mm	76

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Propriedades mecânicas comuns de alguns AHSS (Adaptado de [3])	7
Tabela 3.1 Defeitos mais comuns provenientes do retorno elástico (Adaptado de [17])	16
Tabela 4.1 Materiais utilizados na fase de adaptação ao <i>software</i>	23
Tabela 4.2 Valores de retorno elástico obtidos na análise de funcionalidade do <i>software</i>	26
Tabela 4.3 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração de perfil de lubrificação... ..	28
Tabela 4.4 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração de perfil de lubrificação .	29
Tabela 4.5 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração de <i>clearance</i> da ferramenta	31
Tabela 4.6 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração de <i>clearance</i> da ferramenta	33
Tabela 4.7 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração dos raios de curvatura da peça	35
Tabela 4.8 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração dos raios de curvatura da peça	36
Tabela 5.1 Auxílio à leitura da representação esquemática do processo iterativo de compensação da ferramenta.....	51
Tabela 5.2 Valores obtidos na 1ª fase de iterações de compensação	53
Tabela 5.3 Valores obtidos na 2ª fase de iterações de compensação	60
Tabela 5.4 Valores do parâmetro CP utilizados na 3ª fase de iterações de compensação	64
Tabela 5.5 Valores dos melhores resultados obtidos na 3ª fase de iterações de compensação ...	65

1 Introdução

1.1 Contexto e motivação

Na constituição de um automóvel, seja nos componentes estruturais (chassis, colunas, para-choques, reforços, assentos, etc.) ou nos componentes exteriores (painéis das portas, capô, etc.) a maioria das peças é produzida através do processo de deformação plástica de estampagem de chapa metálica. As formas geométricas destes componentes podem ir desde as mais simples até às mais complexas e, em qualquer um dos casos, existem pormenores geométricos que são mais delicados e mais complexos de executar.

Na Figura 1.1 estão alguns exemplos de componentes estruturais obtidos por estampagem presentes em todos os veículos. É possível observar as diferentes complexidades geométricas que estes podem apresentar.

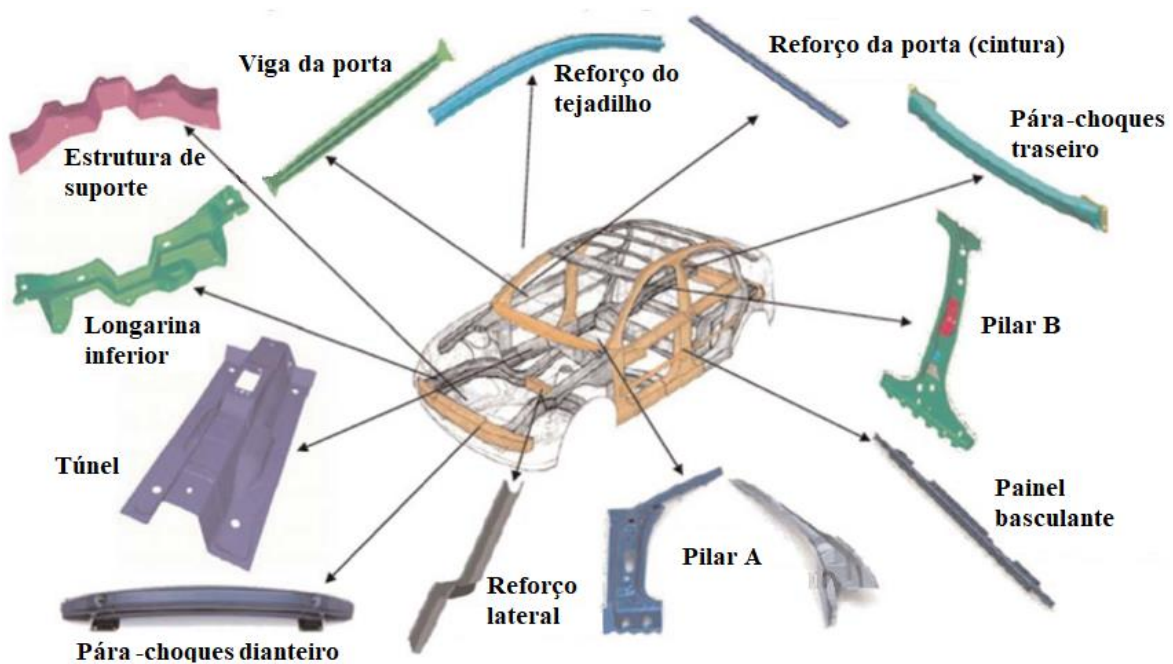


Figura 1.1 Componentes estruturais de automóvel obtidos por estampagem [1]

Os pormenores geométricos mais delicados referidos anteriormente, muitas vezes, têm implicações na função que o componente tem a desempenhar. Por isso, estes têm de ser tidos em conta quando a ferramenta de estampagem que a irá estampar ainda se encontra em fase de projeto e têm de ser tomadas as medidas certas para que a peça possa ser estampada corretamente, com precisão geométrica e dimensional (dentro das tolerâncias definidas).

O projeto de ferramentas de estampagem torna-se uma tarefa um pouco mais complicada quando se lida com alguns dos novos metais que estão a ser cada vez mais utilizados na indústria automóvel, como é o caso dos aços DP. Estes são aços de alta resistência que estão a ser cada vez mais utilizados pela indústria automóvel nos componentes estruturais. As suas propriedades mecânicas, como é o exemplo da elevada resistência mecânica e a resistência ao impacto, permitem uma redução de espessura das chapas utilizadas na constituição dos componentes necessária sendo esta a grande vantagem que os aços DP apresentam face a outros aços e ligas metálicas mais comuns.

A utilização dos aços DP nos componentes estruturais não tem apenas aspetos positivos e uma das grandes dificuldades que existe ao estampar estes aços é a capacidade de recuperação elástica que apresentam.

1.2 Objetivo

O principal objetivo desta dissertação é contribuir, sob o ponto de vista metodológico, na utilização de um programa de simulação de estampagem, conseguir alterar a geometria de uma ferramenta com vista à compensação do retorno elástico que ocorre ao estampar aços DP.

A presente dissertação foi realizada em colaboração com a empresa APAL – Cunhos e Cortantes. Com a empresa, foi definida uma peça em aço DP como objeto de estudo.

1.3 Metodologia abordada

De forma a que seja de fácil compreensão a metodologia abordada nesta dissertação, um fluxograma da mesma encontra-se representado na Figura 1.2.

O projeto da ferramenta inicia-se com o desenho CAD da peça que se quer estampar. É criada uma ferramenta com a geometria nominal da peça com a qual é simulado o processo de estampagem e é obtida a geometria da peça estampada. Nesta peça, é feita uma análise do retorno elástico obtido e este é comparado à tolerância especificada no desenho técnico. Caso o valor de retorno elástico seja superior à tolerância, terá de se proceder à compensação desta ferramenta, num processo iterativo, até que a peça produzida pela ferramenta tenha valor de retorno elástico abaixo da tolerância. Quando se chega à simulação cujo valor cumpre este requisito, é o fim do processo iterativo. Posteriormente, é feita uma análise comparativa entre as geometrias que vão sendo produzidas nas várias iterações realizadas no *software*, para que, num futuro projeto de uma outra ferramenta, o conhecimento adquirido através da análise das alterações que a geometria foi sofrendo possam ser também utilizadas, facilitando o processo iterativo de compensação.

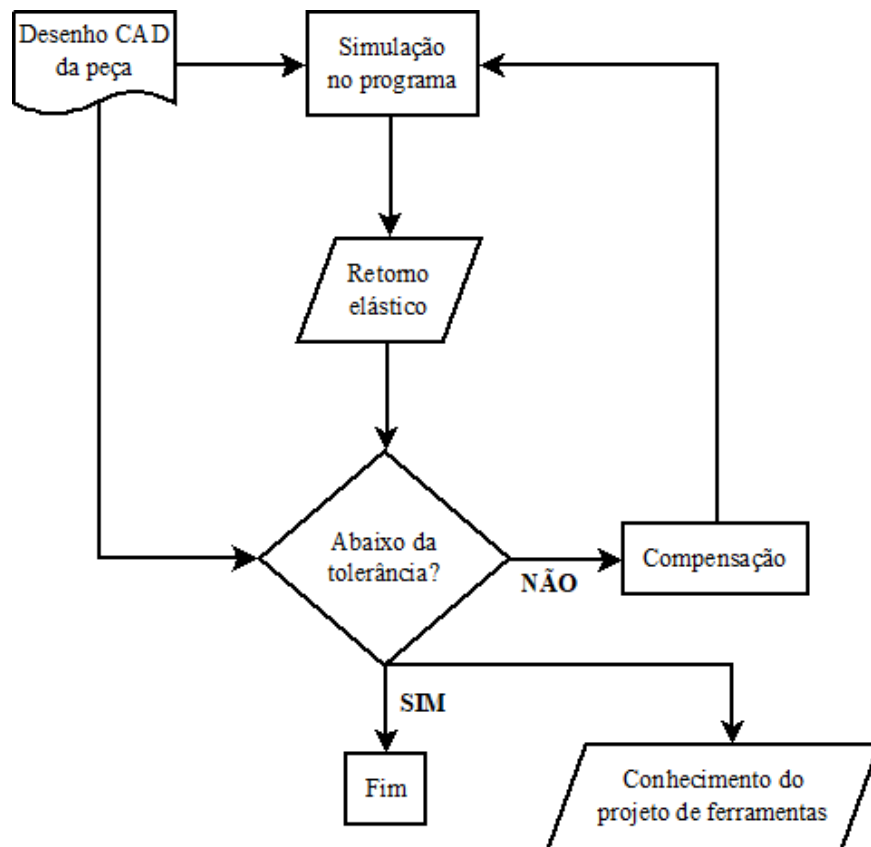


Figura 1.2 Fluxograma da metodologia abordada na dissertação

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se repartida em 7 capítulos e serve a presente secção para uma breve apresentação do conteúdo de cada um deles.

No primeiro capítulo, é explicada a origem do problema sobre o qual a dissertação se debruça (o contexto em que o tema aparece) e qual a motivação para que este seja abordado. De seguida, é também apresentado qual o objetivo que se pretende obter com o trabalho desenvolvido. Por último, apresenta-se a metodologia abordada.

No segundo capítulo, é apresentada uma breve abordagem ao conceito de aços avançados de alta resistência e um breve enquadramento acerca da sua introdução na indústria automóvel e, de seguida, serão abordados os aços DP. Acerca dos mesmos serão referidas as propriedades da microestrutura, será feita uma referência ao processo de produção destes aços e também quais as principais aplicações nas peças de um automóvel.

No terceiro capítulo, são abordadas algumas considerações acerca de estampagem, como os fatores mais influentes num processo de estampagem e quais as dificuldades que se encontram quando se tentam estampar aços avançados de alta resistência. Por último, neste capítulo, é abordado o fenómeno do retorno elástico com foco nos aços DP, quais os principais defeitos visíveis nas peças provocados por este fenómeno e é feita uma abordagem às variáveis que podem ser influentes para contrariar este efeito.

No quarto capítulo, é apresentado e analisado todo o trabalho introdutório ao programa utilizado na realização das simulações. Foram comparados os valores de retorno elástico para a estampagem de uma gama de aços selecionados e também foi analisada a forma como a variação de parâmetros influentes fazem variar os resultados obtidos.

No quinto capítulo, é abordada a peça escolhida para o caso de estudo e todo o trabalho desenvolvido nas modificações da ferramenta.

No sexto capítulo, é feita uma análise dos resultados obtidos na fase de simulação respeitante às iterações de compensação da ferramenta, de modo a perceber relações entre alterações geométricas na ferramenta e os efeitos destas alterações na execução da peça.

Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas conclusões da análise da evolução da ferramenta do caso de estudo quando esta é compensada.

2 Novos aços na indústria automóvel

Nas últimas décadas, tem existido uma forte competição entre as indústrias produtoras de aço e as produtoras de metais de baixa densidade. Esta competição está intrinsecamente ligada a três grandes problemáticas no mundo automóvel: as normas de segurança dos ocupantes dos veículos que têm vindo a ser cada vez mais exigentes; uma crescente exigência do consumidor no que toca ao desempenho dos veículos; e também as preocupações ambientais que, neste caso em concreto, estão ligadas às emissões de CO₂.

2.1 Aços avançados de alta resistência (AHSS)

Como resposta a três problemáticas enunciadas anteriormente, a indústria automóvel está cada vez mais a utilizar a “solução” da indústria do aço, os aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels* – AHSS). Esta gama de aços apresenta propriedades mecânicas como a elevada resistência mecânica e a resistência ao impacto (por exemplo) quando comparados com os aços e outras ligas que mais convencionalmente eram utilizados nos componentes estruturais, o que os torna bastante viáveis. Com a alta resistência destes materiais é possível a redução da espessura das chapas utilizadas nos componentes dos automóveis e assim torná-los mais leves, de modo a contribuir para consumos de combustível mais reduzidos, sem que a sua tenacidade seja afetada.

A gama de aços avançados de alta resistência compreende as seguintes subcategorias [2]:

- **Aços de fase dupla** (DP – *Dual Phase*);
- **Aços de plasticidade induzida por transformação** (TRIP – *Transformation Induced Plasticity*);
- **Aços de fase complexa** (CP – *Complex Phase*);
- **Aços martensíticos** (MART ou simplesmente M – *Martensitic*).

Na Figura 2.1 e na Figura 2.2 é possível observar esquematicamente uma comparação entre a gama de aços avançados de alta resistência e outros aços de diferentes gamas usados na indústria automóvel.

A classificação destes aços difere um pouco da que é dada aos aços de alta resistência mais comuns. Esta classificação foi posta em prática pelo consórcio de várias siderurgias a nível mundial, formado na década de 90, designado ULSAB-AVC (*Ultra-Light Steel Automotive Body – Advanced Vehicle Concept*) e a sua correta apresentação é exposta da seguinte maneira: *XX aaa/bbb* – em que *XX* se refere ao tipo de aço (DP, TRIP, CP ou MART), *aaa* diz respeito ao valor mínimo esperado para a tensão limite de elasticidade do material e *bbb* designa o valor mínimo esperado para a tensão limite de rotura (sendo ambos estes valores apresentados em MPa) [2].

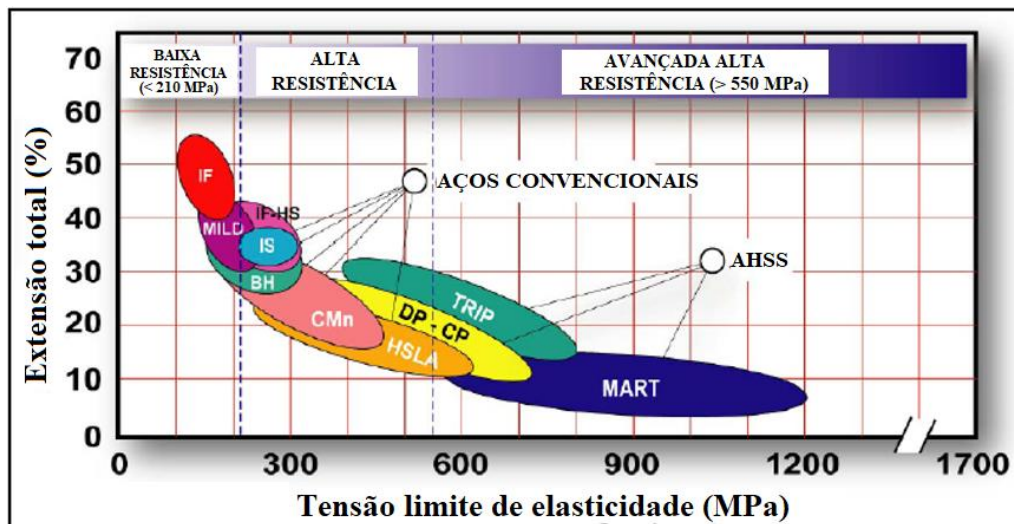


Figura 2.1 Comparação entre aços convencionais e AHSS relativamente à extensão e à tensão limite de elasticidade [3]

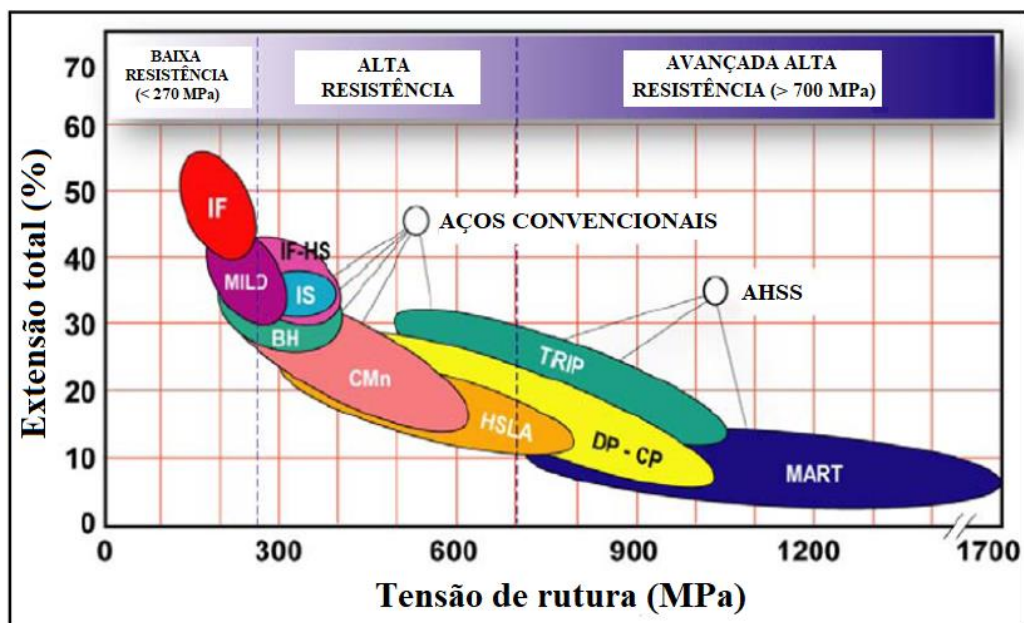


Figura 2.2 Comparação entre aços convencionais e AHSS relativamente à extensão e à tensão de rutura [3]

Na Tabela 2.1, é possível observar os valores de algumas das propriedades mais comuns de alguns dos aços que pertencem à gama AHSS.

Tabela 2.1 Propriedades mecânicas comuns de alguns AHSS (Adaptado de [3])

Aço	Tensão limite de elasticidade (MPa)	Tensão de rutura (MPa)	Extensão total (%)	Coefficiente de encruamento n
DP 280/600	280	600	30-34	0.21
DP 300/500	300	500	30-34	0.16
DP 350/600	350	600	24-30	0.14
DP 400/700	400	700	19-25	0.14
TRIP 450/800	450	800	26-32	0.24
DP 500/800	500	800	14-20	0.14
CP 700/800	700	800	10-15	0.13
DP 700/1000	700	1000	12-17	0.09
Mart 950/1200	950	1200	5-7	0.07
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6	0.065

2.2 Aços DP

Na indústria automóvel, a conjugação de alta resistência mecânica com uma boa ductilidade dos aços utilizados é muito importante. Uma das maneiras que existe para que se possam maximizar ambas as características é, por exemplo, obtendo microestruturas mais complexas do que as usadas convencionalmente nas ligas comuns de baixo carbono (como as microestruturas ferríticas e ferríticas-perlíticas). Ao obter uma microestrutura mais complexa, existem interações mais complexas entre as fases presentes (estas fases devem apresentar variações significativas de dureza entre si). Posto isto e como parte do desenvolvimento dos que viriam a ser chamados os aços avançados de alta resistência, nos finais da década de 70, surgiu um dos primeiros aços cuja microestrutura correspondia às características descritas. Este foi designado aço de fase dupla [4].

Microestrutura e propriedades

Os aços de fase dupla exibem, na grande maioria dos casos, uma tensão de rutura significativamente maior do que os aços mais macios com uma tensão limite de elasticidade similar, razão pela qual tem havido um aumento do seu uso em peças estruturais dos veículos, assim como em componentes que asseguram a segurança em caso de impacto [5].

Estes têm uma microestrutura que pode ser comparada por analogia a um compósito de duas fases. A microestrutura apresenta uma matriz de fase ferrítica (cerca de 80 a 85%) com um reforço de pequenas “ilhas” de fase martensítica (cerca de 15 a 20%). Na grande maioria deste tipo de materiais, a fração volúmica da fase secundária mais dura (neste caso, a martensite) contribui para uma maior resistência do material. Em certos casos, como nos aços laminados a quente, que exigem uma maior capacidade de resistência a estiramentos nos bordos das zonas previamente cortadas, a microestrutura pode também conter traços de fase bainítica [4].

Na Figura 2.3 encontra-se representada esquematicamente (à esquerda) e através de micrografia (à direita) a microestrutura típica de um aço DP.

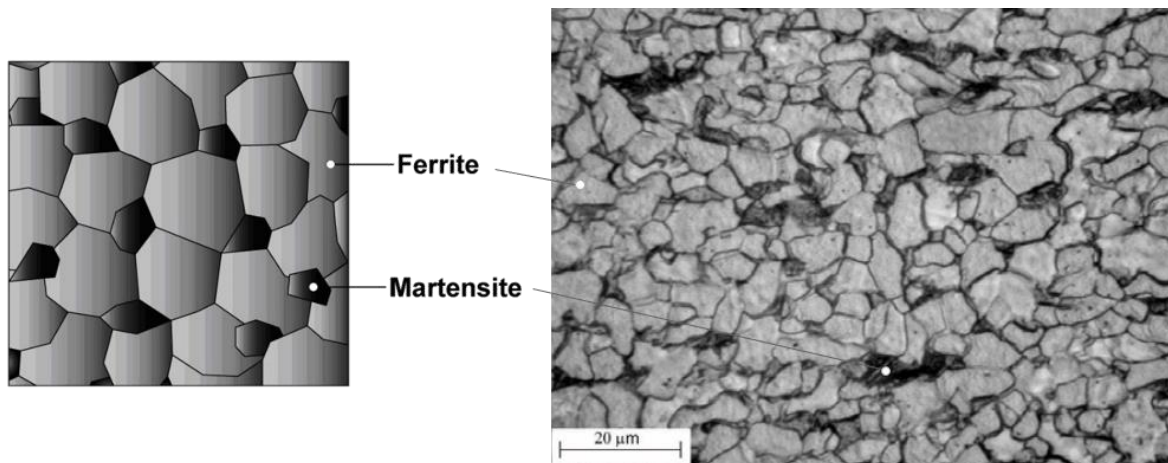


Figura 2.3 Microestrutura de um aço DP (Adaptado de [6] e [7])

Esta microestrutura proporciona a estes aços algumas propriedades mecânicas interessantes como combinação de alta resistência e boa ductilidade, tensão limite de elasticidade contínua (não se mantém constante durante a deformação) e alta taxa de encruamento [8].

Uma outra propriedade característica dos aços DP é a anisotropia da sua microestrutura, ou seja, à semelhança de muitos dos materiais metálicos utilizados em engenharia, as suas propriedades mecânicas variam em função da direção da sollicitação aplicada. Este fenómeno deve-se, essencialmente, à estrutura metalográfica, ao teor de elementos de liga e aos tratamentos térmicos previamente aplicados [9].

As propriedades dos aços DP podem ser ajustadas e otimizadas através do controlo e da modificação da microestrutura (a alteração do tamanho e morfologia dos grãos de ferrite e das ilhas de martensite). No entanto, a resistência destes aços depende, principalmente, da fração volumétrica e da dureza da fase martensítica [5].

Vários investigadores deste tipo de aços têm vindo a reportar que a fração volúmica de martensite na microestrutura é um dos fatores mais determinantes nas propriedades mecânicas dos aços de fase dupla. Segundo as suas pesquisas, e tal como já foi dito anteriormente, a um aumento da fração volúmica de martensite está associado também um aumento de propriedades como a dureza, a tensão limite de elasticidade e a tensão de rotura, contrariamente à extensão total do material, que diminui [10].

Nas Figura 2.4 está presente a curva de tensão-extensão e a Figura 2.5 apresenta o diagrama limite de enformabilidade composto por várias gamas de aços DP (respetivamente), em que é possível observar alterações das propriedades.

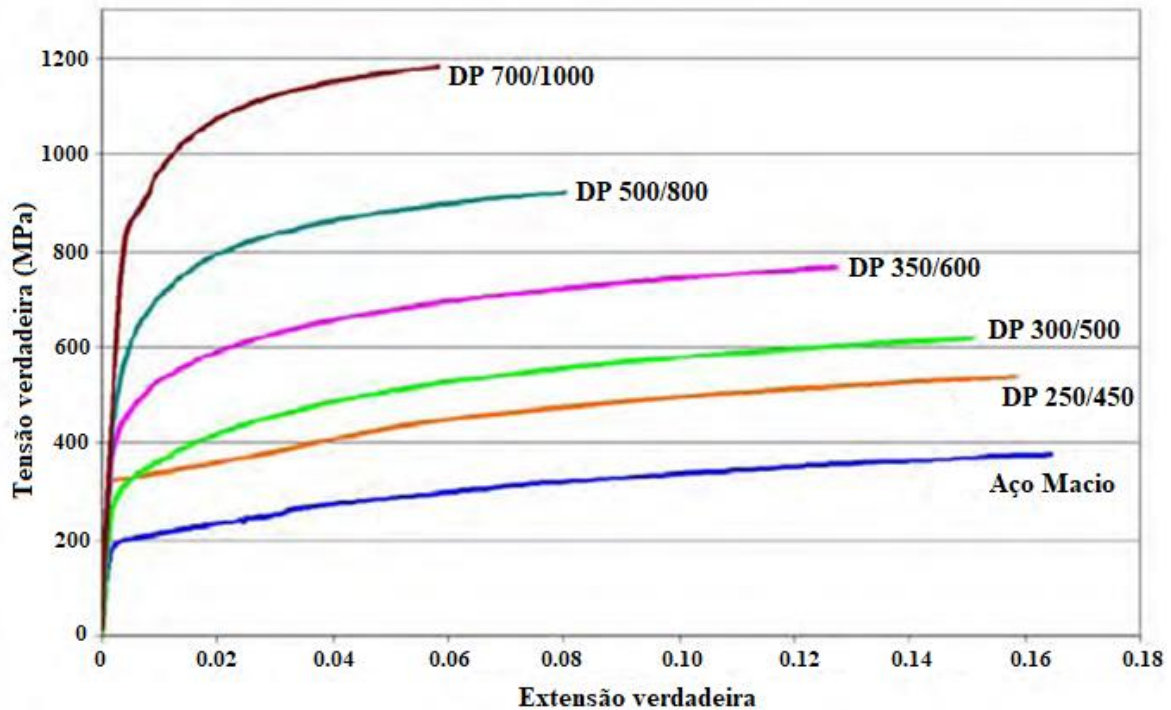


Figura 2.4 Comparação de várias curvas tensão-extensão de aços DP e de um aço macio [6]

Na Figura 2.6 e na Figura 2.7 é possível observar uma comparação dos mesmos processos de estampagem efetuados em diferentes aços (um aço macio e dois aços DP). É possível observar que à medida que “percorremos” a gama DP, com o aumento da resistência do material (de 600 MPa para 1000 MPa), a enformabilidade do material diminui, tal como sugerem as curvas tensão-extensão ilustradas na Figura 2.4.

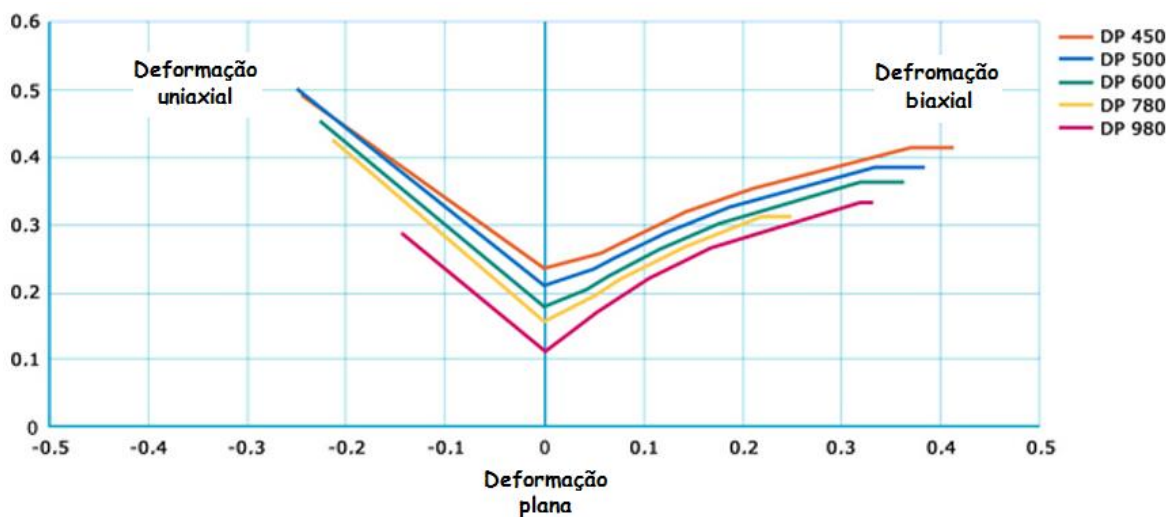


Figura 2.5 Comparação de curvas de enformabilidade de vários aços DP

Para determinar os estados de tensão críticos que limitam a enformabilidade de um material, foi desenvolvida uma ferramenta gráfica chamada diagrama de limite de enformabilidade (*forming limit diagram - FLD*), que é muito utilizada na indústria metalúrgica. O *FLD* é composto pelos valores das tensões principais a que os elementos superficiais das chapas são sujeitos, quando submetidos a testes de enformabilidade em diferentes trajetórias de deformação em condições de tensão plana. Desta forma, é possível estabelecer uma barreira entre duas zonas: uma zona segura (abaixo das curvas), onde a estricção é negligenciável e uma zona insegura (acima das curvas), em que tal instabilidade pode ocorrer. O limite entre estas duas zonas é geralmente uma linha que liga vários pontos que representam valores de deformação medidos em provetes sujeitos aos testes que apresentaram estricção. Esta linha é chamada de curva de limite de enformabilidade (*forming limit curve - FLC*) [11].

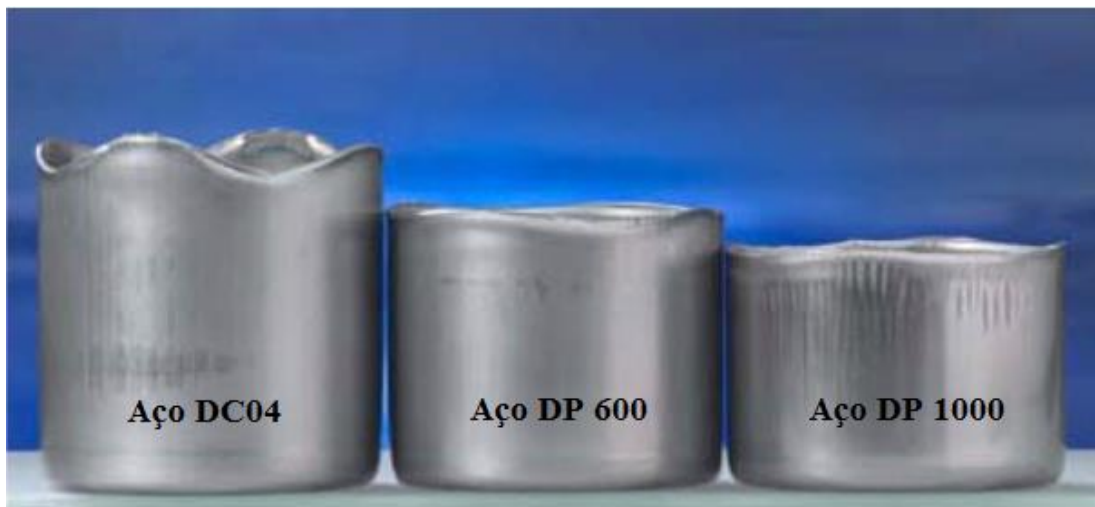


Figura 2.6 Comparação de estampagem profunda de aços DC04, DP600 e DP1000 (Adaptado de [12])

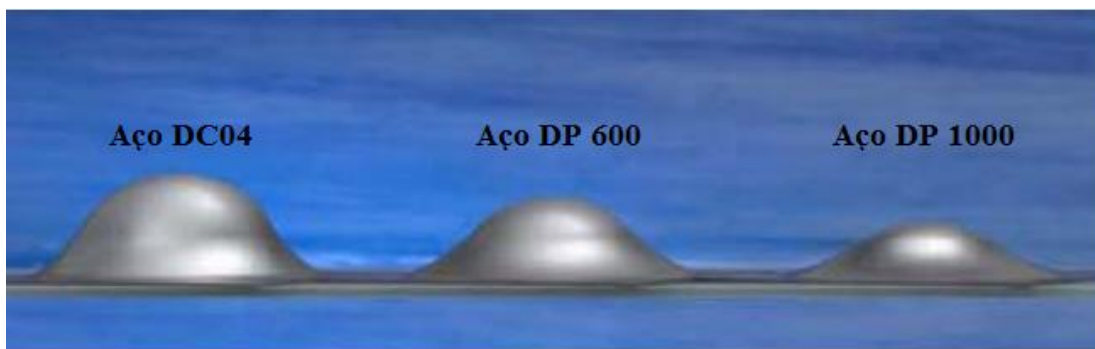


Figura 2.7 Comparação de estampagem por expansão de aços DC04, DP600 e DP1000 (Adaptado de [12])

3 Considerações sobre estampagem

3.1 Fatores influentes na estampagem

Em qualquer processo de estampagem existem fatores de variadas naturezas que são bastante influentes na correta execução de uma peça. Estes fatores devem ser tidos em conta desde o momento em que se está a projetar a peça. São aqui destacados os fatores que estão relacionados com: o material utilizado para produzir a peça, o lubrificante utilizado no processo, a estampa plana, a ferramenta de estampagem e a prensa [13].

Material da chapa

- Valor de n – coeficiente de encruamento do material;
- Valor de r – coeficiente de anisotropia normal;
- Anisotropia no plano da chapa (r_0 , r_{45} e r_{90});
- Espessura da chapa;
- Sensibilidade à taxa de extensão da tensão de deformação (*Strain rate sensitivity of yield stress*);
- Rugosidade da superfície;
- Revestimento da superfície.

Lubrificante

- Sensibilidade à pressão;
- Sensibilidade à temperatura;
- Estabilidade;
- Espessura e posição de aplicação.

Estampa plana

- Tamanho;
- Forma;
- Estado das arestas (rebarbas, muito trabalhadas, etc.);
- Localização/posição na matriz.

Ferramenta

- Materiais da matriz, do cunho e das placas cerra-chapa;
- Rugosidade das superfícies;
- Raios de curvatura da matriz e do cunho.

Prensa

- Velocidade de atuação;
- Método utilizado para atuar as placas cerra-chapa;
- Rigidez da estrutura;
- Precisão dos movimentos.

3.2 Dificuldades em estampar aços DP

Como já foi referido, a gama de aços DP é constituída por vários aços com características mecânicas diferentes entre si, podendo assim ser utilizados em produtos com exigências funcionais diferentes. As grandes vantagens ao utilizar os aços DP prendem-se com redução de peso dos componentes fabricados mantendo as propriedades mecânicas que lhes são exigidas. No mundo automóvel, a redução de peso dos veículos tem estado no foco de todos os fabricantes, o que leva a uma utilização cada vez mais frequentes dos aços desta gama.

Pelo facto de os aços DP serem relativamente recentes e de as suas propriedades não serem idênticas às dos aços mais macios tradicionalmente utilizados na indústria, têm trazido alguns problemas quando estes são sujeitos a processos de estampagem. Os principais desafios em estampar aços avançados de alta resistência são os que se apresentam de seguida [14]:

- Dificuldade em determinar as propriedades exatas do material através de métodos convencionais;
- Inconsistência nas propriedades de lote para lote;
- Aparecimento de fraturas precoces nas operações de enformação, que exigem a investigação da fratura;
- Aumento das forças que têm de ser aplicadas pelas ferramentas;
- Desgaste rápido das ferramentas;
- Maior retorno elástico – pouca precisão geométrica e dimensional.

3.3 Retorno elástico

3.3.1 Retorno elástico nos aços DP

Um dos maiores desafios para os produtores de peças em aços avançados de alta resistência e, mais concretamente, em aços DP é prever e eliminar o fenómeno de retorno elástico (*springback*). Este fenómeno pode ser observado após as forças da ferramenta de estampagem deixarem de estar aplicadas à peça no molde. Quando esta força deixa de ser aplicada, as tensões residuais internas da peça deixam de estar em equilíbrio com as forças que lhe estavam a ser externamente aplicadas e o material tende a retornar ligeiramente até à posição que ajuda a estabelecer o equilíbrio do estado de tensão interno [15].

Na Figura 3.1 é possível observar a forma final de duas peças deformadas pela mesma ferramenta, sendo uma das peças (direita) em aço mais tradicional e a outra (esquerda) em aço DP, na qual o fenômeno de retorno elástico é bastante evidente. Na Figura 3.2, é feita a mesma comparação, mas esquemática, onde se observa também uma alteração à forma das paredes laterais (empeno).



Figura 3.1 Comparação do retorno elástico em duas peças (à esquerda em aço DP e à direita em aço tradicionalmente utilizado) produzidas pela mesma ferramenta (Adaptado de [6])

O fenômeno do retorno elástico é facilmente observável na Figura 3.3 em que os pontos críticos do comportamento do material estão representados numa curva de tensão-extensão. As diferenças entre o comportamento de um aço macio convencional e um aço de alta resistência quanto ao retorno elástico também são evidentes.

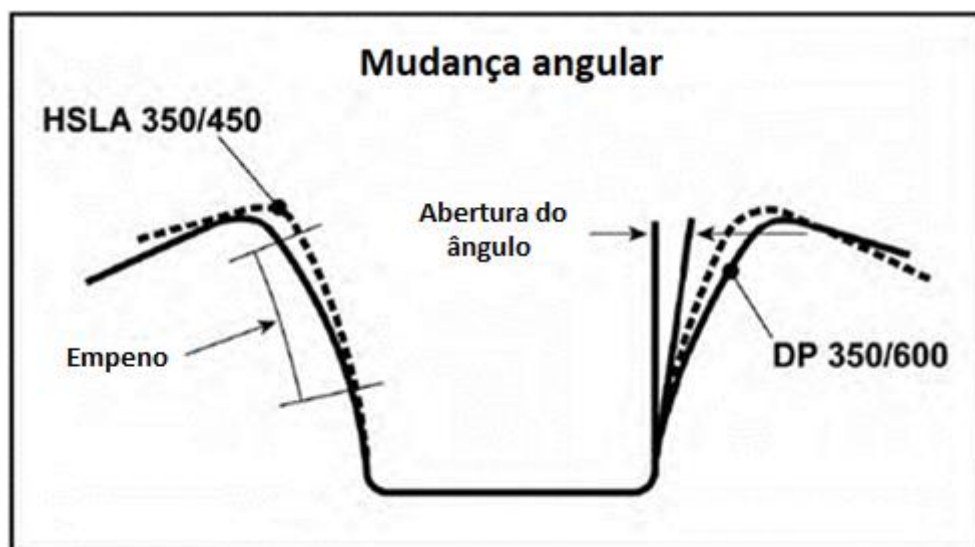


Figura 3.2 Comparação esquemática da alteração angular (devida ao retorno elástico) e a ocorrência do empeno mais acentuado na produção de peças em aço DP e em aço convencional [6]

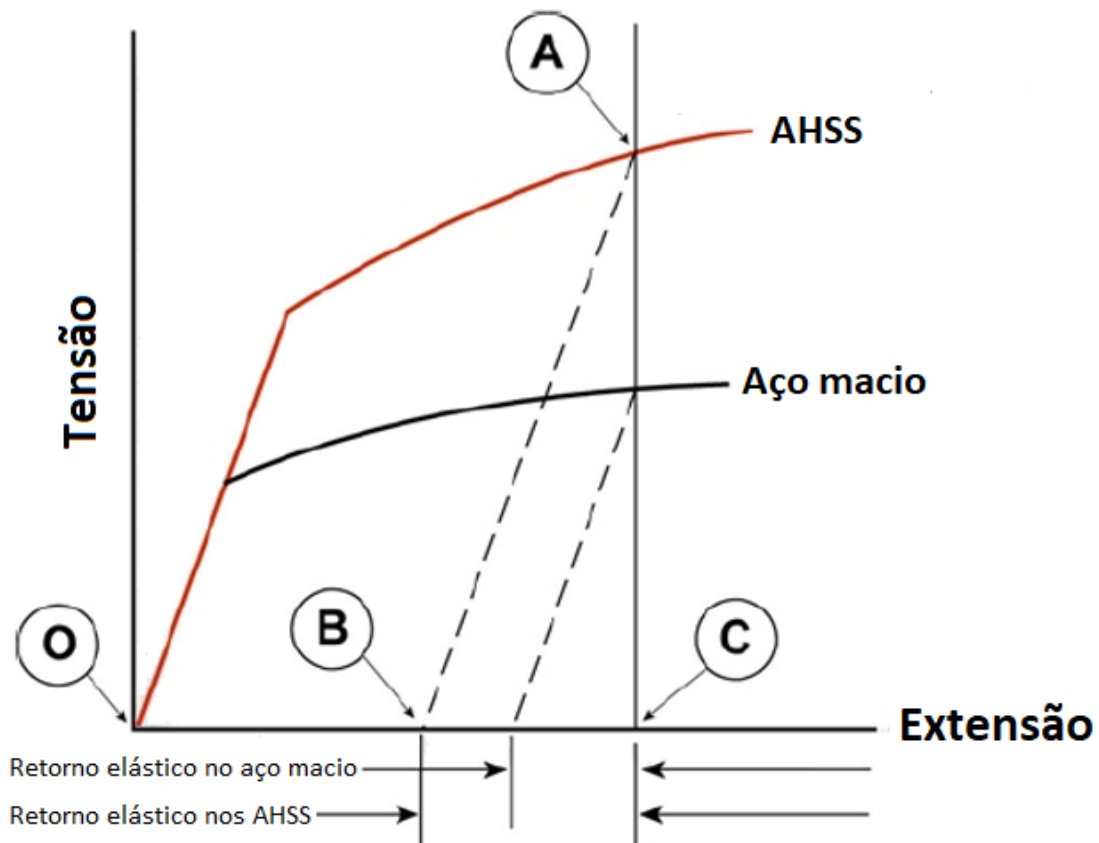


Figura 3.3 Comparação do retorno elástico entre um aço avançado de alta resistência e um aço macio através das curvas de tensão-extensão [14]

Olhando para a Figura 3.3 e interpretando o seu significado, quando ocorre a descarga das forças (ao retirar cunho da ferramenta de estampagem), vamos do ponto A no nível de deformação plástica para o ponto B, ao longo da linha AB. A linha OB representa a deformação plástica (permanente) enquanto o segmento BC representa a recuperação elástica do material.

Como foi dito anteriormente, a gama de aços de fase dupla apresenta diferentes aços com diferentes propriedades mecânicas como, por exemplo, a tensão limite de elasticidade e o coeficiente de encruamento. O fenómeno de retorno elástico está fortemente ligado a estas duas propriedades, pelo que é de esperar que dois aços de fase dupla diferentes, tenham um comportamento diferente quando sujeitos à mesma força de deformação, como se pode observar na Figura 3.4.

O comportamento das duas chapas ilustradas na Figura 3.4 é o expectável pois, aplicando o mesmo método de previsão de retorno elástico a curvas de tensão-extensão de várias gamas de aço de fase dupla (como é o caso da Figura 2.4 ilustrada anteriormente), é fácil de ver que o retorno elástico para uma gama mais resistente (DP 1000) é maior do que numa de resistência inferior (DP 600).

Como se pode verificar na Figura 3.5, o segmento AO é maior que BO, indicando que o retorno elástico correspondente à curva do aço DP 700/1000 é superior ao do DP 350/600 para a mesma deformação aplicada.



Figura 3.4 Comparação de retorno elástico entre um aço DP 600 e um DP 1000 [16]

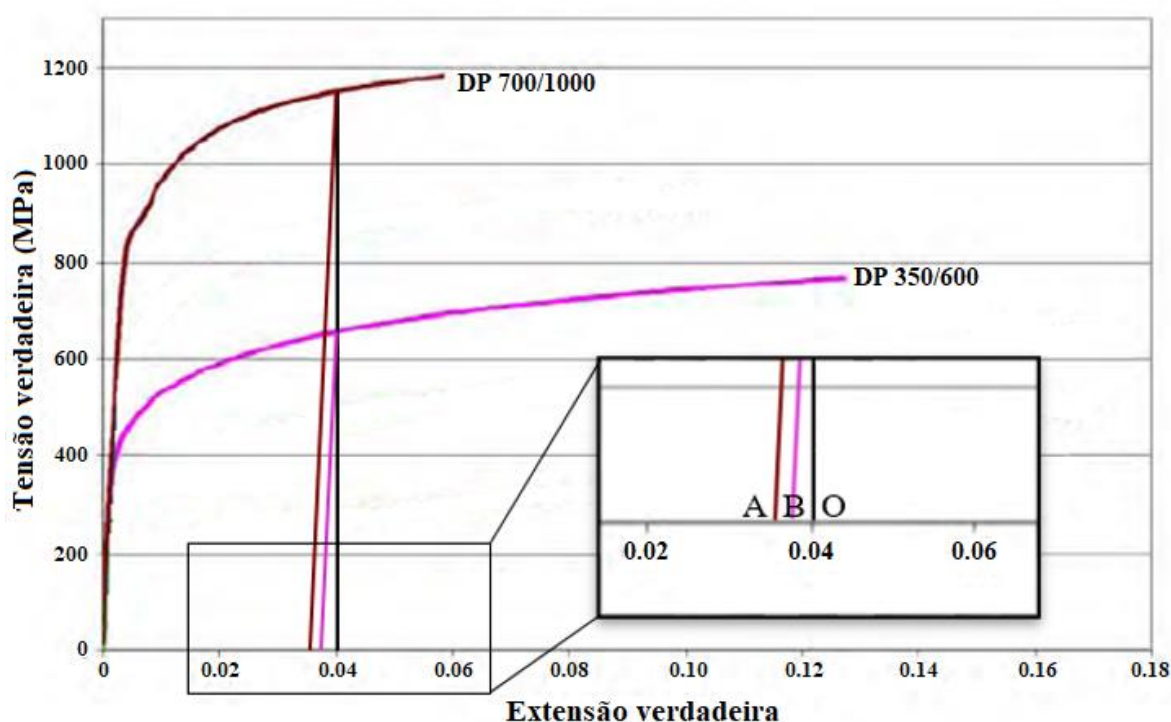




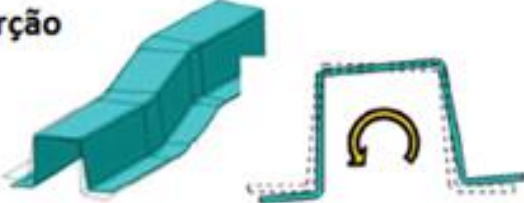
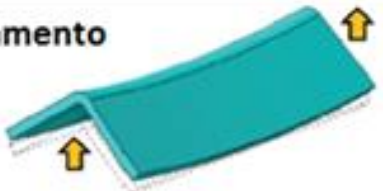

Figura 3.5 Diferença entre o retorno elástico de um aço DP 350/600 e DP 700/1000 evidenciado nas curvas tensão-extensão (Adaptado de [6])

3.3.2 Defeitos mais comuns provenientes do retorno elástico

Os maiores problemas que surgem quando se tentam estampar aços DP prendem-se com o facto de à sua alta resistência estarem associadas baixas capacidades de elongação total. Esta baixa capacidade de elongação conduz a que, por vezes, as chapas fissurem durante o processo de estampagem. Por outro lado, associado às elevadas tensões de limite de elasticidade, existem problemas de variação dimensional (devido ao fenómeno de retorno elástico) e de enrugamento das superfícies estampadas [17].

Na Tabela 3.1 podemos observar alguns dos tipos de defeitos mais comuns provenientes do fenómeno de retorno elástico após um processo de estampagem.

Tabela 3.1 Defeitos mais comuns provenientes do retorno elástico (Adaptado de [17])

Defeitos e a sua aparência	Mecânismo de ocorrência
Abertura de ângulo 	Recuperação elástica do momento flector devido ao desequilíbrio de tensões na direcção da espessura após a dobraçem
Empeno das paredes 	Recuperação elástica do momento flector devido ao desequilíbrio de tensões na direcção da espessura após dobraçem e desdobraçem
Torção 	Recuperação elástica do momento torsor devido ao desequilíbrio de tensões no plano com estiramentos e contracções da flange
Arqueamento 	Recuperação elástica do momento flector ao longo do cunho devido ao desequilíbrio de tensões na direcção da espessura
Encurvadura 	Deformação por encurvadura na descarga do cunho devido ao desequilíbrio de tensões na estampagem do painel

Tal como já foi dito e como pode ser comprovado pelas figuras anteriormente apresentadas, o retorno elástico é um fenómeno que tem bastante impacto na geometria final da peça estampada manifestando-se este, na grande maioria dos casos, negativamente. As alterações provenientes do retorno elástico, sejam elas em pormenores geométricos pequenos ou grandes, levam a que peça tome uma forma que não é a que foi projetada.

Quando não existe qualquer tipo de prevenção quanto a este fenómeno, as empresas produtoras de peças estampadas incorrem num aumento de custos não só devidos ao desperdício de material, mas também aos atrasos nas linhas de produção e alterações às ferramentas [18].

Posto isto, é então de extrema importância o estudo dos métodos utilizados atualmente que visam a redução do fenómeno de retorno elástico.

3.3.3 Redução do retorno elástico

3.3.3.1 Variáveis influentes no retorno elástico

Já foram referidos anteriormente alguns dos fatores mais influentes num processo de estampagem. Na Figura 3.6 é possível observar quatro grupos de variáveis que mais influenciam o fenómeno de retorno elástico.

Têm sido utilizados diversos métodos de modo a controlar este fenómeno. A maioria destes focam-se numa abordagem mecânica de modo a aumentar a tensão da chapa durante o processo de dobragem da mesma, método este que tem tido bons resultados e se tem provado eficiente na redução da magnitude do retorno elástico. Este tipo de abordagem é preferencial, sempre que seja possível a sua utilização, porque o retorno elástico residual que continua a existir é relativamente insensível às variações naturais, sejam estas no processo ou nas condições do material da chapa, promovendo assim uma resposta consistente ao fenómeno.

Apesar de este método obter resultados bastante consistentes, na maioria das operações de estampagem esta abordagem não é adequada pois o aumento da tensão na chapa pode facilmente causar a cedência do material, chegando assim ao aparecimento de fraturas. Para alguns tipos de operações de estampagem mais específicos pode ser usada uma seleção adequada do rácio R/t (raio de curvatura para espessura da chapa) ou outros parâmetros podem ser usados para reduzir o retorno elástico.

Um outro método comumente utilizado na indústria consiste na conceção de ferramentas de forma a compensar o fenómeno de retorno elástico. A ferramenta é projetada de modo a que, quando o material sofre o fenómeno de retorno, a peça fica com a forma pretendida. Para que haja uma correta implementação deste método, é importante uma correta previsão do comportamento do material quando este sofre o retorno elástico [18].

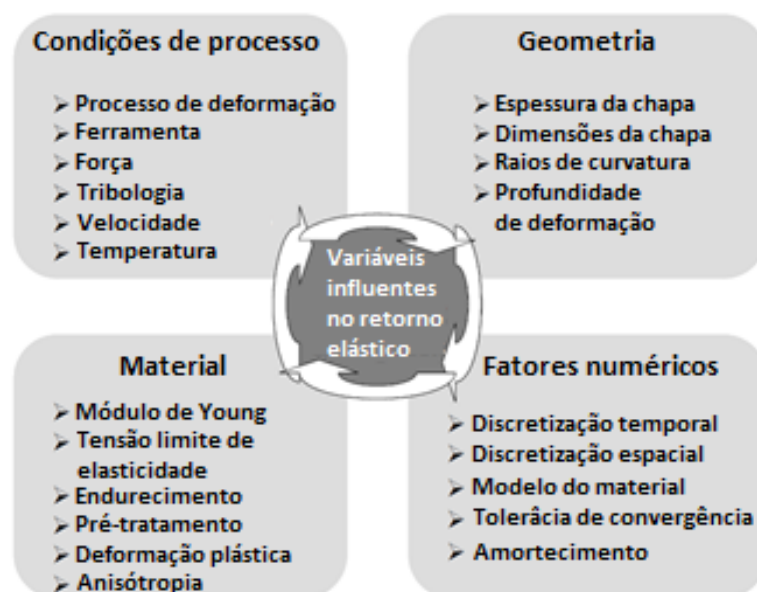


Figura 3.6 Variáveis influentes no fenómeno de retorno elástico [19]

3.3.3.2 Previsão do retorno elástico e compensação de ferramentas

A tarefa de prever o retorno elástico tem vindo a revelar-se algo desafiadora devido a fatores como a sua sensibilidade numérica (numa perspetiva das simulações através de Elementos Finitos), a sua sensibilidade física e também devido a uma fraca caracterização dos materiais quanto ao seu comportamento em ciclos de carga, descarga e carga em direção oposta.

Assumindo que o retorno elástico consegue ser previsto com alguma precisão, persiste o problema de saber então o que fazer com os resultados obtidos e conseguir obter uma ferramenta capaz de produzir a peça aceitável de acordo com o projeto. Posto isto, dois tipos de análise ao retorno elástico devem ser feitos: a análise com o objetivo de obter uma previsão é uma análise do tipo “trás para a frente” e, posteriormente, para que se possa obter uma ferramenta produza os resultados pretendidos, deve ser feita uma análise “de frente para trás” equacionando os resultados obtidos na previsão.

Ferramentas cujas peças exigem apenas operações de dobragem mais simples e com raios de curvatura constantes são facilmente desenhadas para a compensação deste fenómeno tendo em conta modelos empíricos, mas este método é aplicável a um número reduzido de materiais e espessuras de chapa. Para peças em que os materiais utilizados são diferentes dos tradicionalmente e para geometrias mais complexas (com raios de curvatura alternados e curvas/formas tridimensionais mais complexas) a compensação havia sido tradicionalmente levada a cabo através de um método de tentativa e erro com ensaios, exigindo não só custos elevados, mas também bastante tempo.

Nas últimas décadas, tem havido um crescente interesse na utilização de Métodos de Elementos Finitos para o estudo e para a previsão do retorno elástico nas mais variadas operações de estampagem e para geometrias cada vez mais complexas.

Os programas que existem atualmente direcionados para a conceção de ferramentas de estampagem (que têm por base o Método dos Elementos Finitos) são eles próprios uma ferramenta muito poderosa que permitem obter os resultados pretendidos envolvendo apenas custos computacionais. Estes programas de simulação permitem visualizar virtualmente o desempenho da ferramenta desenvolvida sem que esta tenha de ser produzida, podendo as empresas não despendem de tanto tempo nas linhas de produção a experimentar ferramentas novas e incorrer em menos custos (materiais, paragem das linhas de produção, correções das ferramentas, etc.).

Estes programas revelam-se também bastante eficazes na previsão e na compensação respeitantes ao fenómeno de retorno elástico. Com os modelos de comportamento mecânico dos materiais em conjuntos com os parâmetros numéricos corretamente ajustados (Elementos Finitos), é possível simular a estampagem da peça e conseguir uma visualização de quais as zonas ou pormenores geométricos em que o retorno elástico é mais evidente e permite uma execução aceitável (dentro das tolerâncias estabelecidas no projeto).

3.4 Efeito de *Bauschinger*

Devido à sua alta resistência, os aços DP têm uma elevada tendência para a ocorrência do retorno elástico e, derivado da sua microestrutura que contém uma fase mais macia (ferrite) e uma fase mais dura (martensite), exibe também um efeito *Bauschinger* significativamente maior durante a inversão da trajetória de deformação em comparação com os aços tradicionalmente utilizados na indústria automóvel [5].

A maioria dos materiais metálicos, ao serem deformados plasticamente a frio, oferece uma resistência que aumenta gradualmente com a progressão da deformação, devido ao fenómeno de encruamento. Ao trabalhar metais que apresentam esta característica, esta pode ser usada como uma vantagem, permitindo a produção de componentes com maior resistência mecânica e dureza. Porém, usar este fenómeno como vantagem, apenas é possível quando as solicitações a que o material é sujeito são sempre no mesmo sentido.

Quando um material é deformado plasticamente e posteriormente descarregado, surgem tensões residuais a nível microscópico, devido maioritariamente aos diferentes estados de tensão que se criam entre os grãos do material. Quando este mesmo material volta a ser carregado em sentido contrário, verifica-se que as tensões residuais criadas vão influenciar a entrada em deformação plástica, sendo a tensão limite de elasticidade inferior. O nome que se dá a este fenómeno é efeito de *Bauschinger* e este ocorre em metais policristalinos quando estes são sujeitos a solicitações sucessivas em sentido inverso.

Na maioria dos casos, os metais dúcteis apresentam curvas de tensão-extensão verdadeiras idênticas para tração e compressão. Quer isto dizer que, observando a Figura 3.7, a tensão limite de elasticidade para tração (T_{LET}) é aproximadamente igual (em módulo) à tensão limite de elasticidade para compressão (T_{LEC}).

Sujeitando um provete a um esforço de tração até ao ponto B (tensão superior à T_{LET}), segundo a trajetória O-A-B e descarregando segundo a trajetória B-C, o provete apresentará uma deformação plástica permanente equivalente a C. Ao tracionar de novo o provete segundo a trajetória C-B, a plasticidade apenas se inicia no ponto B, numa tensão superior a T_{LET} .

Por outro lado, ao sujeitar o provete a um esforço de compressão, após carga O-A-B e descarga B-C, é possível observar que, devido às tensões residuais microscópicas, a plasticidade se vai iniciar no ponto D, com uma tensão limite de elasticidade, T'_{LEC} , menor do que T_{LEC} . Enquanto que a tensão limite de elasticidade à tração aumentou, a tensão limite à compressão diminuiu. O comportamento do material é análogo na situação inversa - primeiro sujeito à compressão, descarregado e depois sujeito a tração [9].

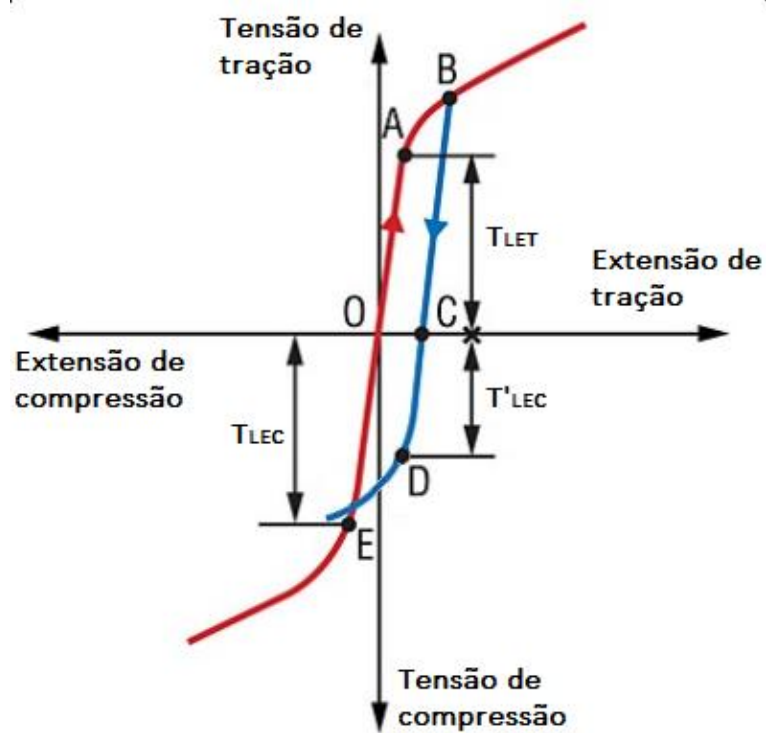


Figura 3.7 Representação esquemática do efeito de *Bauschinger* (Adaptado de [20])

4 Breve análise da funcionalidade do *software*

4.1 Introdução

Pelo facto de nesta dissertação serem abordados aços com um comportamento mecânico que não é análogo ao dos aços macios e outros mais convencionais. A primeira fase do trabalho passou pela adaptação a um *software* de simulação de estampagem, utilizando para o efeito peças simples como uma forma em L e uma forma em U

É importante referir que em todas as simulações realizadas, as propriedades dos materiais foram mantidas constantes – *default* do programa para todos os aços considerados. Assim sendo, temos a curva tensão-extensão dos materiais considerada segundo os modelos combinados de *Swift* e *Hockett-Sherby*, sem endurecimento cinemático (tensão limite de elasticidade constante durante toda a deformação), modelo da curva limite de elasticidade de *Hill* e curvas limite de enformabilidade de referência dos fabricantes do material utilizado.

4.1.1 Peça seleccionada

Foi utilizada uma peça com geometria simples (ver Figura 4.1) e de dimensões tais que os resultados das simulações conseguissem espelhar de forma mais clara as diferenças obtidas relativamente à forma nominal.

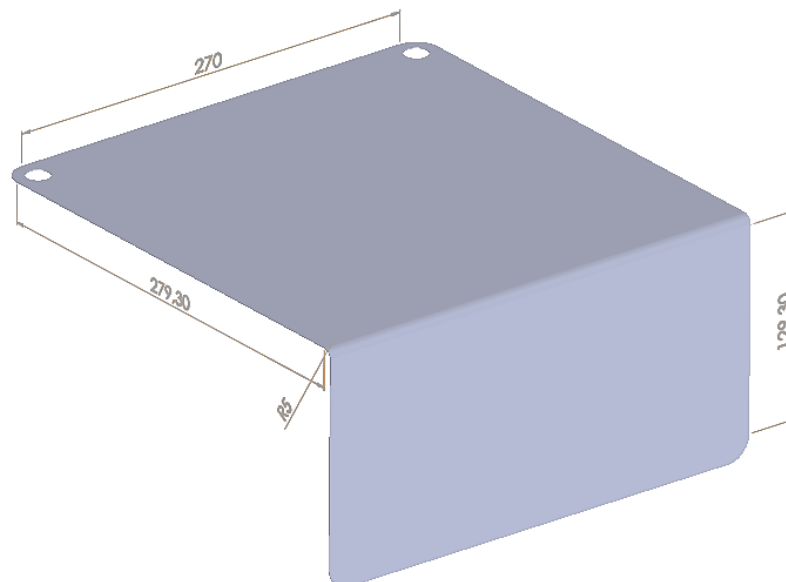


Figura 4.1 Dobra utilizada para adaptação ao *software*

As simulações realizadas para os diferentes tipos de aço tiveram todas como base o mesmo processo de deformação e os diversos parâmetros também se mantiveram à exceção da força aplicada pelo cerra-chapa, que teve de ser ajustada consoante o material da que se está a estampar. Para o cálculo da força de dobra, foi usada a seguinte fórmula [21]:

$$F_{\text{cerra-chapa}} = \frac{F_{\text{dobragem}}}{3} = 0,333 \times \frac{\sigma_R \cdot W \cdot t^2}{L}$$

σ_R – Tensão de rotura do material [MPa];

W – Comprimento longitudinal da dobra [m];

t – Espessura da chapa [m];

L – Distância entre cerra-chapa e linha de aplicação da força de dobra [m].

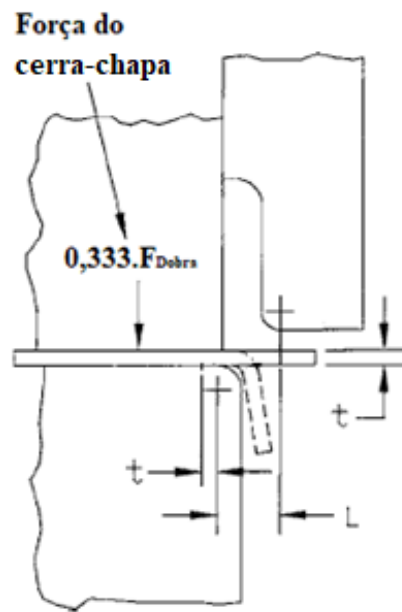


Figura 4.2 Representação esquemática da força do cerra-chapa (Adaptado de [21])

Na peça/ferramenta em questão, os valores fixos utilizados na fórmula apresentada anteriormente são de W = 300 mm, t = 0,7 mm e L = 6,7 mm.

4.1.2 Sequência de operação

Como se pode constatar pela geometria da peça utilizada nesta fase, o processo de estampagem que aqui foi simulado é bastante simples: em primeiro lugar, existe o movimento descendente da placa cerra-chapa de modo a que esta assente na chapa e garanta o correto posicionamento da mesma na matriz. O posicionamento é também auxiliado por pinos guia que estão colocados na matriz e que vão penetrar orifícios previamente realizados na chapa. De seguida, é realizado o movimento do punção que irá forçar a chapa a dobrar de modo a que, na sua posição final (do punção), a chapa atinja a forma idealizada (Figura 4.1). As fases deste processo de estampagem podem ser observadas na Figura 4.3 que se apresenta de seguida.

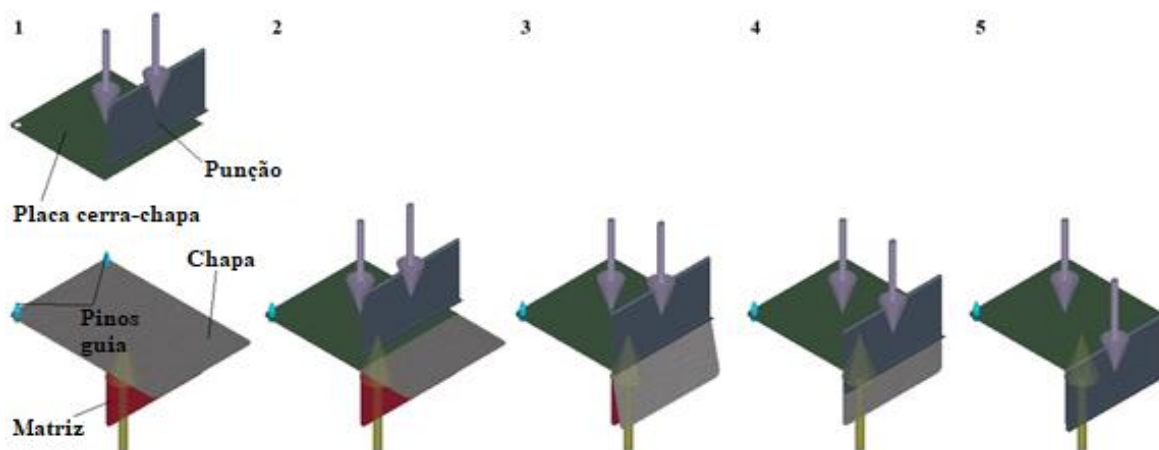


Figura 4.3 Representação esquemática do processo de estampagem utilizado na fase de adaptação do *software*

4.1.3 Materiais utilizados

Os aços utilizados nas simulações são de gamas mais convencionais (e de menor resistência), aços de alta resistência e aços DP. O objetivo é saber quais os resultados dos valores de retorno elástico que o programa fornece para a mesma operação (com todos os parâmetros iguais, à exceção da força do cerra-chapa, como já havia sido referido) e para a mesma peça, mudando apenas o material da chapa.

Na Tabela 4.1, são apresentados os materiais selecionados para as simulações realizadas. Os valores das propriedades que se encontram na tabela (σ_e – tensão limite de elasticidade e σ_R – tensão de rutura) são valores típicos para estes aços, de acordo com a marca selecionada através da base de dados do programa. Os valores destas e outras propriedades podem ser consultados nas referências bibliográficas associadas à tabela.

Tabela 4.1 Materiais utilizados na fase de adaptação ao *software*

Aço	σ_e (MIN) [MPa]	σ_e (MAX) [MPa]	σ_R (MIN) [MPa]	σ_R (MAX) [MPa]
DC06 (Tata Steel) [26]	---	170	270	330
DX52 (Tata Steel) [25]	140	300	270	420
IF260 (Arcelor Mittal) [24]	260	300	380	440
HSLA300 (Arcelor Mittal) [23]	300	360	390	450
DP450 (Arcelor Mittal) [22]	280	340	450	530
DP600 (Arcelor Mittal) [22]	330	410	600	700
DP780 (Arcelor Mittal) [22]	450	550	780	900
DP980 (Arcelor Mittal) [22]	700	850	980	1100

4.1.4 Efeitos do material no retorno elástico

Após as simulações, o programa devolve uma imagem da forma que a chapa adquire após a operação de estampagem, assim como os valores de retorno elástico em cada ponto da peça que são devolvidos tendo como referência os valores das coordenadas de ponto da peça nominal e representam o afastamento da peça conseguida em relação à peça que foi projetada. Os valores de retorno elástico são devolvidos numa forma de escala de cores que tem como extremos os valores máximos positivo e negativo em mm (ver Figura 4.4).

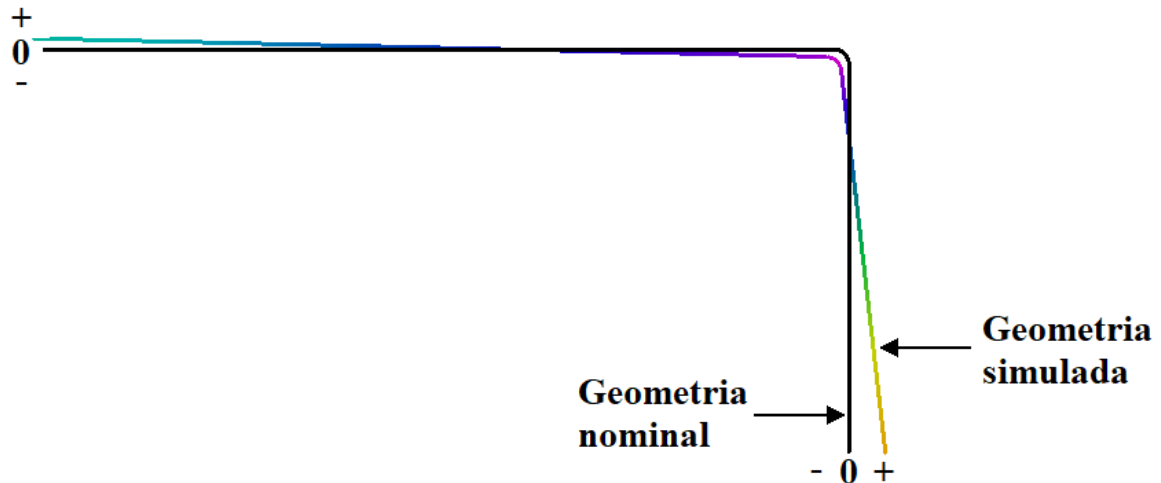


Figura 4.4 Exemplo explicativo da escala de cores do *software*

De seguida, é possível comparar os resultados da simulação da estampagem da peça em L (Figura 4.1) em aço DC06 (ver Figura 4.5) e DP980 (ver Figura 4.6), por serem estas as simulações em que se obteve o melhor e o pior resultado de retorno elástico, respetivamente. Na Tabela 4.2, estão representados os valores de retorno elástico máximo que se obtiveram para cada um dos aços testados.

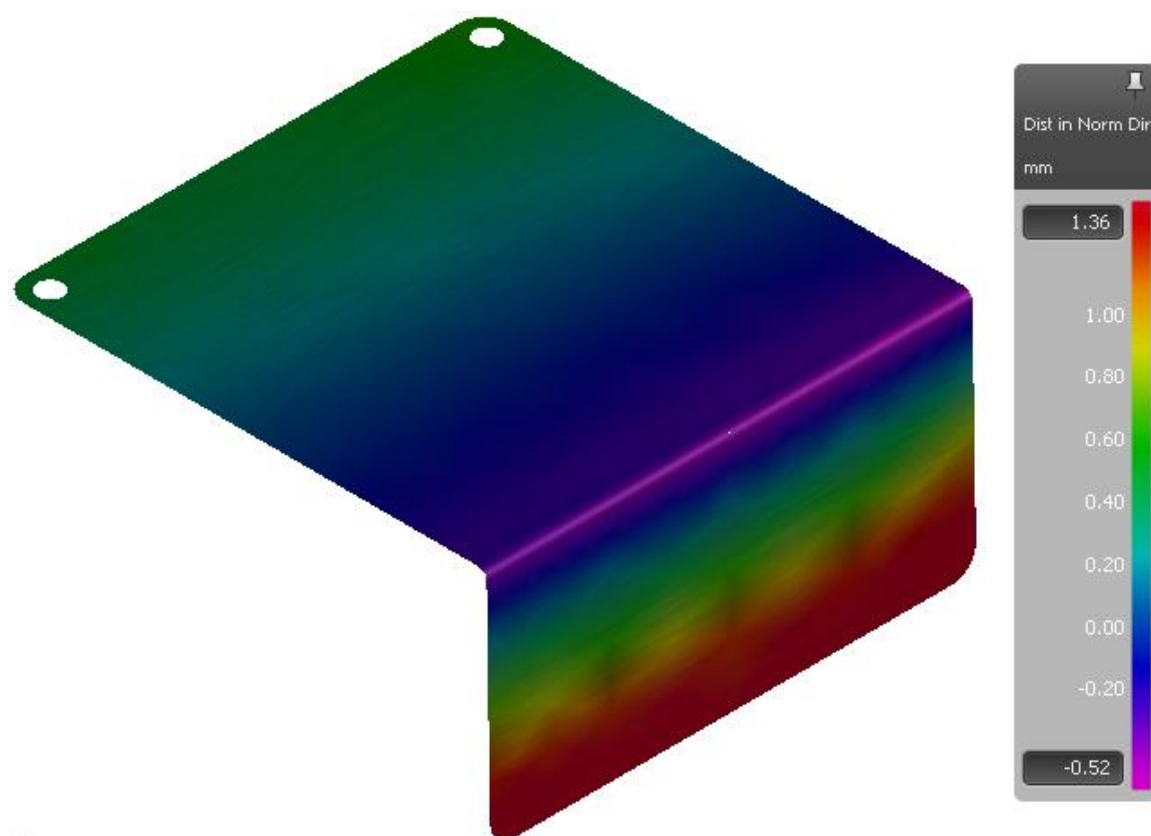


Figura 4.5 Análise da funcionalidade do *software*: *output* para aço DC06

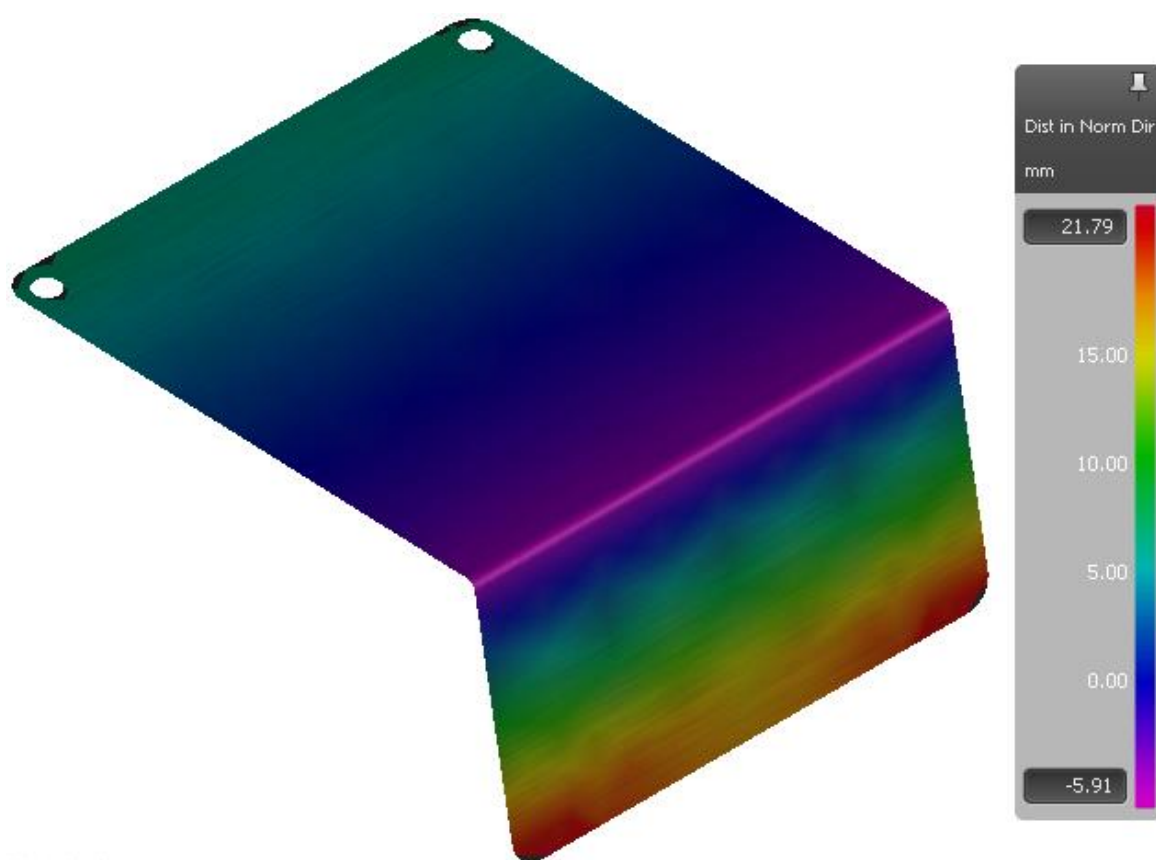


Figura 4.6 Análise da funcionalidade do *software*: *output* para aço DP980

Tabela 4.2 Valores de retorno elástico obtidos na análise de funcionalidade do *software*

Aço	F_{serra-chapas} [N]	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]
DC06 (Tata Steel)	2411	-0,52	1,36
DX52 (Tata Steel)	3069	-0,94	3,77
IF260 (Arcelor Mittal)	3215	-1,68	6,62
HSLA300 (Arcelor Mittal)	3288	-1,53	6,02
DP450 (Arcelor Mittal)	3872	-2,10	8,28
DP600 (Arcelor Mittal)	5114	-2,82	10,99
DP780 (Arcelor Mittal)	6576	-3,59	13,68
DP980 (Arcelor Mittal)	8037	-5,91	21,79

É possível verificar que os valores de retorno elástico nos aços DP são superiores aos que se verificam na utilização de aços macios. Dentro desta gama, os valores vão aumentando com a resistência do material.

4.2 Efeitos dos parâmetros de operação no retorno elástico

4.2.1 Introdução

Para avaliar efeitos da operação no retorno elástico em estampagem, foi utilizada uma peça em U (Figura 4.7).

As simulações foram feitas com apenas dois materiais, para que se pudesse também apurar se o material de fabrico da peça influenciaria ou não a forma como estes parâmetros se manifestam nos valores finais de retorno elástico. Para este efeito, foram utilizados os aços DC06 e DP980, que foram os que apresentaram o melhor e o pior resultado, respetivamente, em termos de retorno elástico na dobra realizada anteriormente.

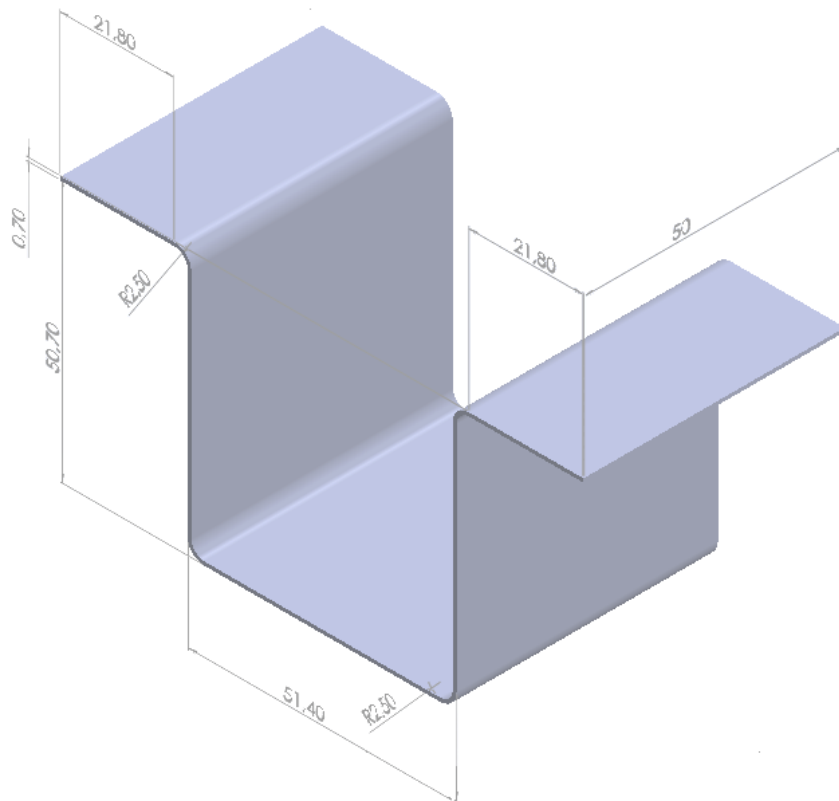


Figura 4.7 Peça utilizada na fase de variação de parâmetros

4.2.2 Parâmetros considerados

Nesta fase, os parâmetros que foram alterados de uma simulação para a outra, foram a tribologia, ou seja, o tipo de lubrificante utilizado no processo de estampagem; no programa, o parâmetro designado por *clearance* que designa o espaço que existe entre a matriz e o cunho para além da espessura nominal da chapa (*offset* = espessura nominal da chapa + *clearance*); por último, o parâmetro alterado, foi o raio de curvatura das dobras na peça.

4.2.2.1 Tribologia

Na variação dos parâmetros tribológicos, foi feito variar o perfil de lubrificação aplicado ao processo. Estes perfis são inerentes ao próprio programa e são os seguintes:

- **Mill Oil** (perfil *default* do *software*) - coeficiente de fricção (μ) de 0,15 constante;
- **Blank Wash** - coeficiente de fricção (μ) de 0,2 constante;
- **PreLube** - coeficiente de fricção (μ) de 0,1 constante;
- **PreLube Pressure** - coeficiente de fricção (μ) 0,12. O coeficiente de fricção efetivo tem uma dependência da pressão.
- **PreLube Velocity** - coeficiente de fricção (μ) 0,12. O coeficiente de fricção efetivo tem uma dependência da velocidade.
- **PreLube Enhanced** - coeficiente de fricção (μ) 0,12. O coeficiente de fricção efetivo tem uma dependência da pressão e da velocidade do processo.

Serão apresentados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4, para ambos os materiais, os valores dos extremos das escalas de cores respectivas ao retorno elástico, assim como a soma dos seus módulos (retorno elástico total). Este último valor será, para cada um dos perfis, comparado com o valor obtido com o perfil de lubrificação *Mill Oil* através de diferença percentual, permitindo avaliar qual o melhor resultado final obtido. A Figura 4.8 e a Figura 4.9 referem-se ao pior e ao melhor resultado obtido, respetivamente, para o aço DC06, enquanto que, da mesma forma, a Figura 4.10 e a Figura 4.11 se referem ao aço DP980.

Tabela 4.3 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração de perfil de lubrificação

DC06				
Perfil de Lubrificação	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
<i>Mill Oil</i>	-0,29	0,49	0,78	---
<i>Blank Wash</i>	-0,77	0,56	1,33	+70,51
<i>PreLube</i>	-0,62	0,54	1,16	+48,72
<i>PreLube Pressure</i>	-0,81	0,55	1,36	+74,36
<i>PreLube Velocity</i>	-0,42	0,56	0,98	+25,64
<i>PreLube Enhanced</i>	-1,18	0,43	1,61	+106,41

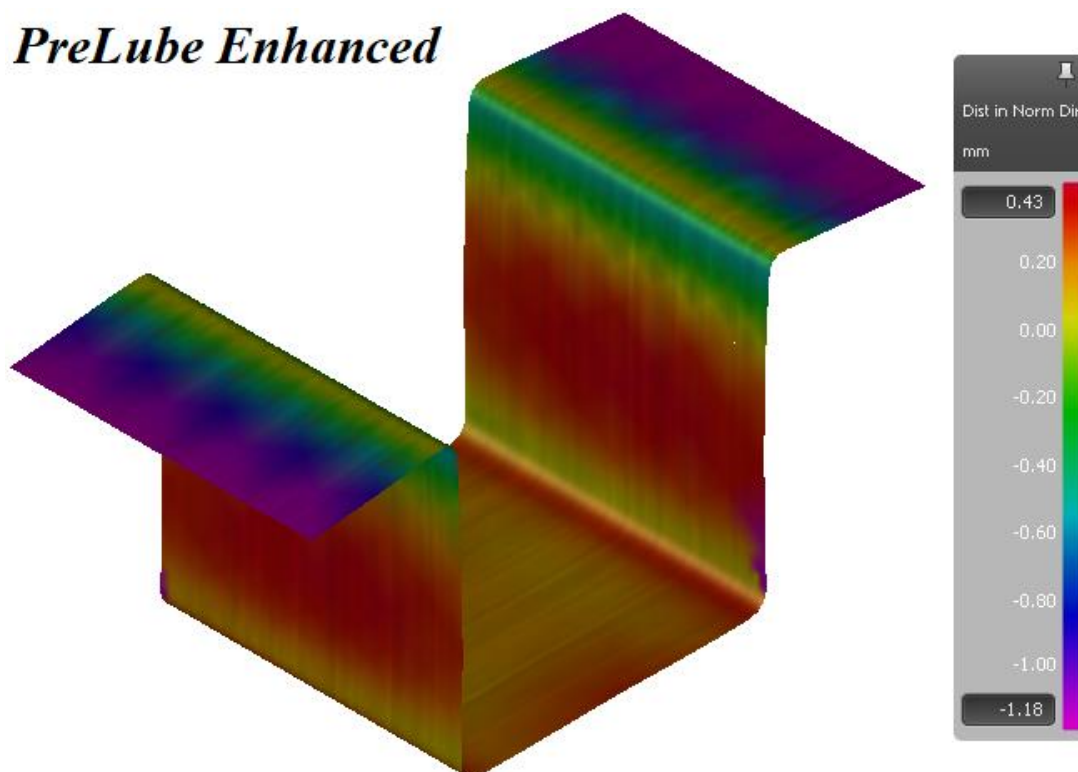


Figura 4.8 Variação do perfil tribológico— estampagem de aço DC06 com perfil *PreLube Enhanced* (pior resultado)

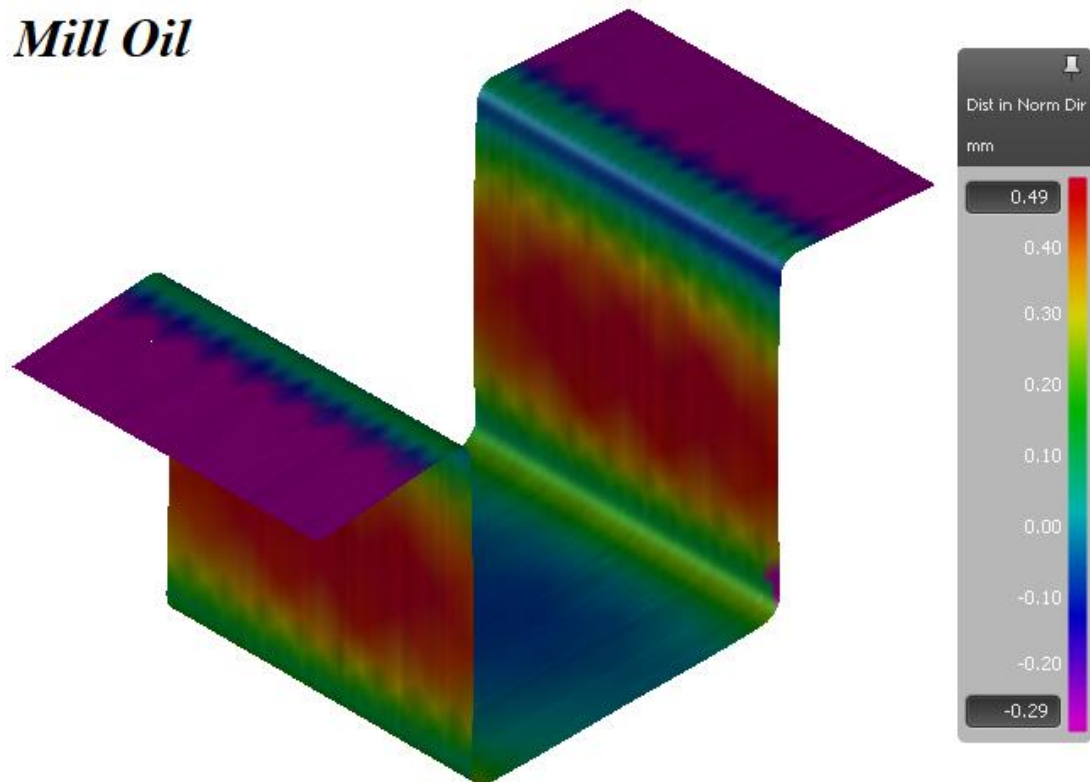


Figura 4.9 Variação do perfil tribológico - estampagem de aço DC06 com perfil *Mill Oil* (melhor resultado)

Tabela 4.4 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração de perfil de lubrificação

DP980				
Perfil de Lubrificação	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
<i>Mill Oil</i>	-6,94	2,16	9,1	---
<i>Blank Wash</i>	-7,51	2,58	10,09	+10,88
<i>PreLube</i>	-6,65	2,01	8,66	-4,84
<i>PreLube Pressure</i>	-6,72	1,99	8,71	-4,29
<i>PreLube Velocity</i>	-6,57	2,07	8,64	-5,05
<i>PreLube Enhanced</i>	-1,87	3,11	4,98	-45,27

Blank Wash

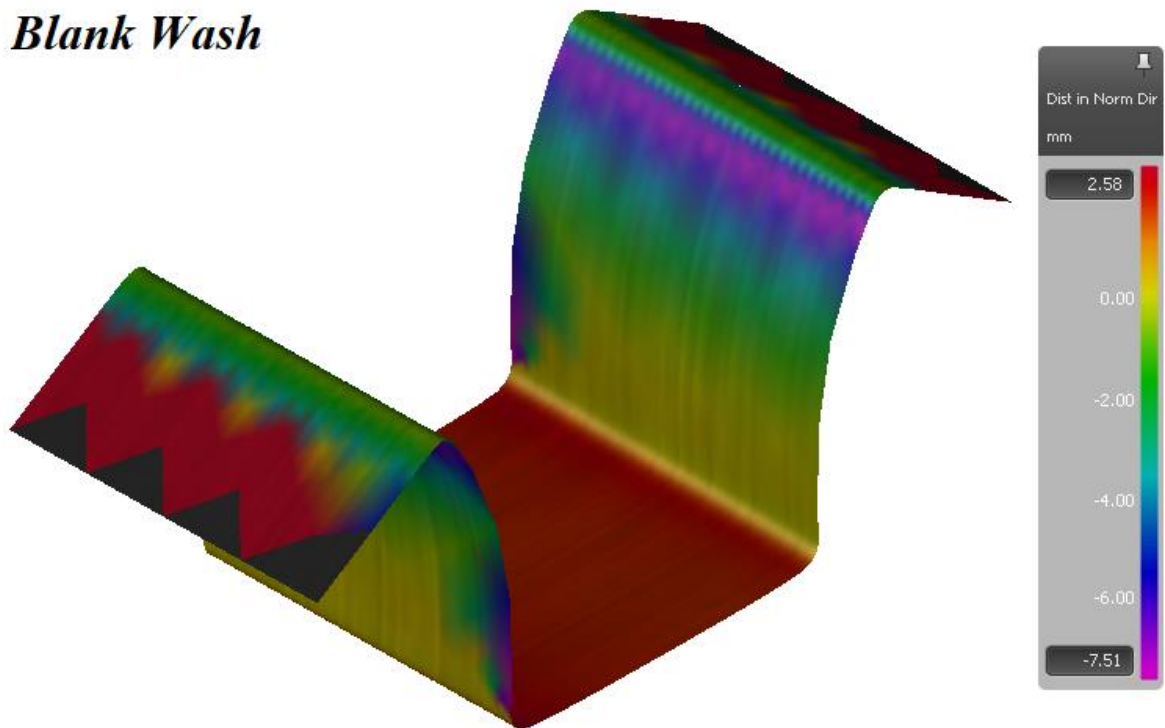


Figura 4.10 Variação do perfil tribológico – estampagem de aço DP980 com perfil *Blank Wash* (pior resultado)

PreLube Enhanced

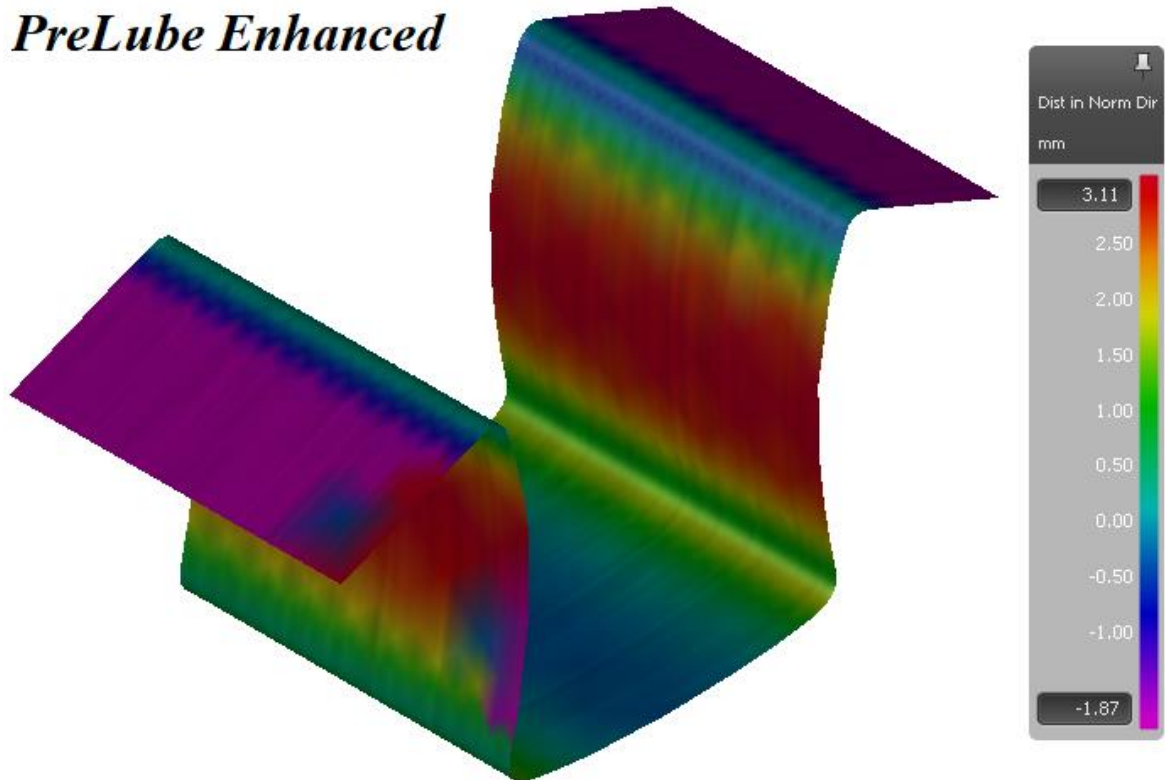


Figura 4.11 Variação do perfil tribológico – estampagem de aço DP980 com perfil *PreLube Enhanced* (melhor resultado)

Analisando os resultados obtidos para os perfis de lubrificação do *software*, vemos que não existe uma ligação direta entre qualquer um dos perfis e o aumento ou diminuição dos valores de retorno elástico pois, para o aço macio (DC06), existe sempre um aumento dos valores deste fenómeno (em relação ao perfil *default*) enquanto que no aço DP980, à exceção do perfil *Blank Wash*, todos os restantes valores obtidos são menores, ou seja, a estampagem foi melhorada em todos os perfis, atingindo o melhor valor com o *PreLube Enhanced*. É possível, então, concluir que o programa acusa as mudanças tribológicas, havendo uma variação dos valores de retorno elástico. No entanto, dependendo do material que se está a estampar, o comportamento de cada perfil pode ser diferente, não havendo sempre uma consequência certa (aumento ou diminuição dos valores do fenómeno estudado).

4.2.2.2 Espaço entre cunho e matriz (*offset*)

Nas alterações à *clearance*, foi considerada uma faixa de valores (em intervalos de 0,01) que se situa entre 0 mm e 0,07 mm, sendo que 0,07 corresponde a 10% da espessura da chapa considerada para estas simulações.

Os valores de retorno elástico resultantes de cada uma das simulações estão registados na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6, assim como uma comparação através de diferença percentual com o valor *default* do programa (neste caso, com *clearance* de valor igual a 0) para facilitar a análise dos mesmos. A Figura 4.12 e a Figura 4.13 referem-se ao pior e melhor resultado, respetivamente, para o aço DC06 enquanto que a Figura 4.14 e a Figura 4.15 se referem de forma idêntica ao aço DP980.

Tabela 4.5 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração de *clearance* da ferramenta

DC06				
<i>Clearance</i> [mm]	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
0	-0,29	0,49	0,78	---
0,01	-0,18	0,62	0,80	+2,56
0,02	-0,49	0,79	1,28	+64,10
0,03	-0,49	0,87	1,36	+74,36
0,04	-0,38	1,24	1,62	+107,69
0,05	-0,37	1,15	1,52	+94,87
0,06	-0,32	1,61	1,93	+147,44
0,07	-0,29	1,59	1,88	+141,03

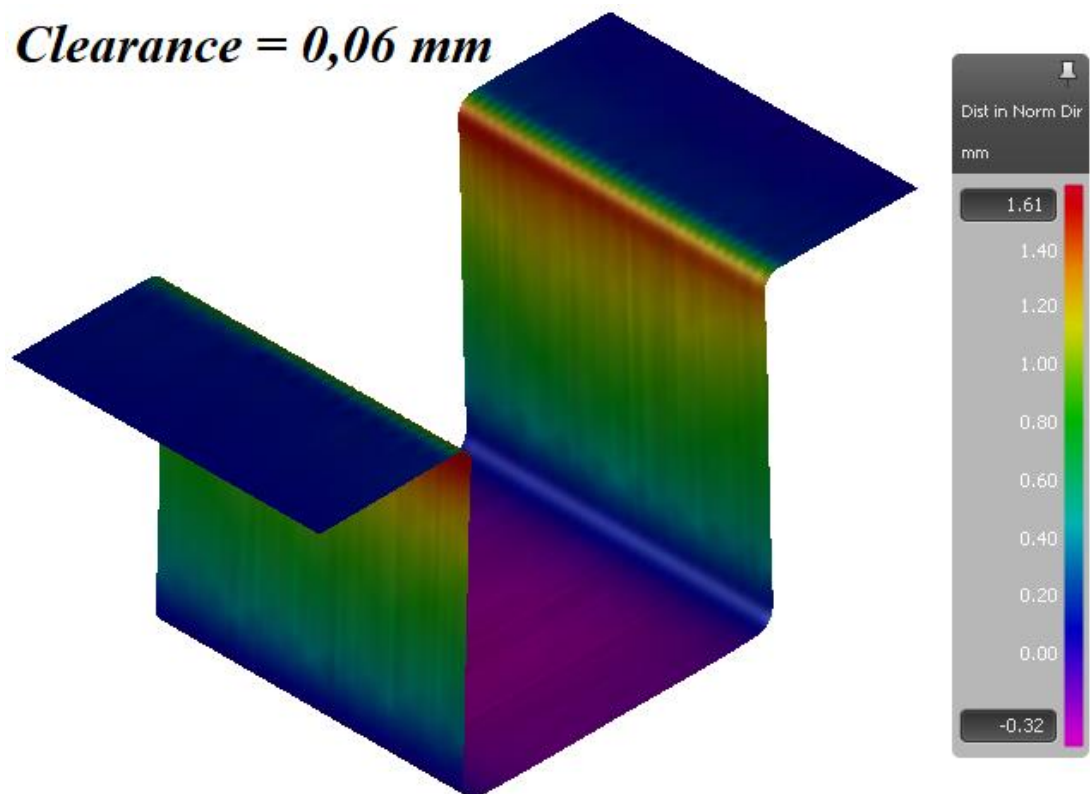


Figura 4.12 Variação do *offset* da ferramenta – estampagem de aço DC06 com *clearance* de 0,06 mm (*offset* = 0,76 mm) (pior resultado)

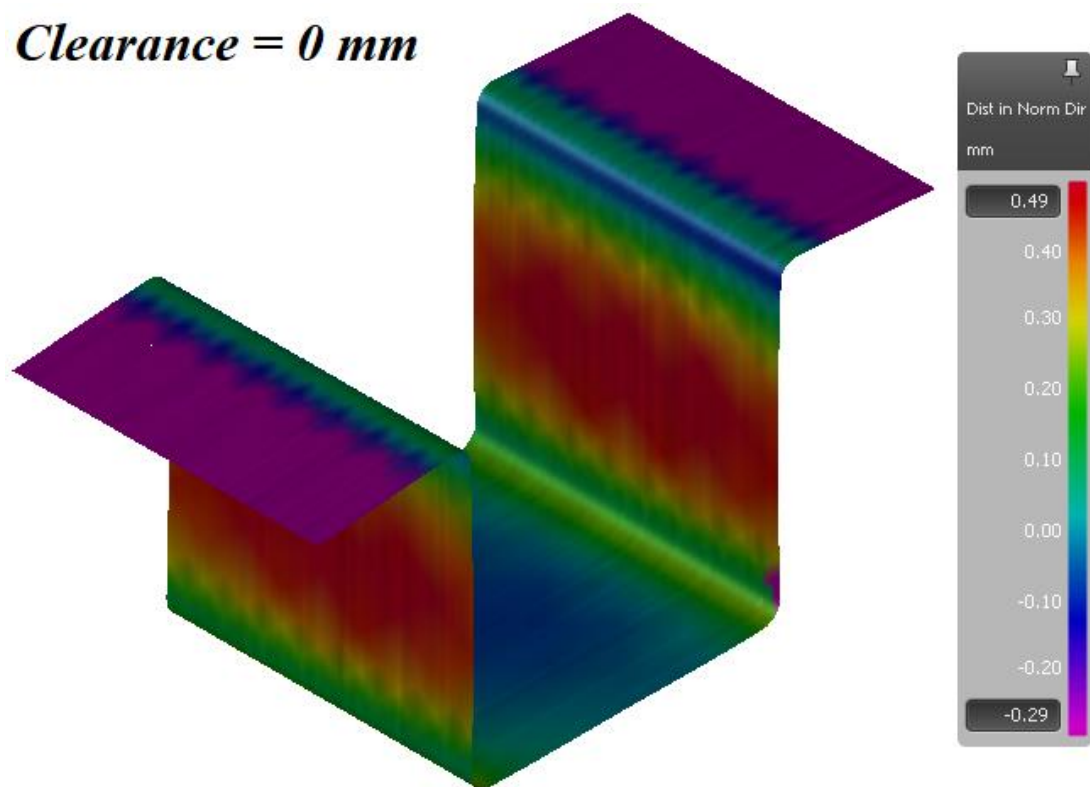


Figura 4.13 Variação do *offset* da ferramenta – estampagem de aço DC06 com *clearance* nula (*offset* = 0,7 mm) (melhor resultado)

Tabela 4.6 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração de *clearance* da ferramenta

DP980				
<i>Clearance</i> [mm]	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
0	-6,94	2,16	9,10	---
0,01	-7,02	2,40	9,42	+3,52
0,02	-6,27	1,95	8,22	-9,67
0,03	-6,12	1,90	8,02	-11,87
0,04	-6,24	1,88	8,12	-10,77
0,05	-6,69	2,09	8,78	-3,52
0,06	-6,39	2,05	8,44	-7,25
0,07	-6,18	1,92	8,10	-10,99

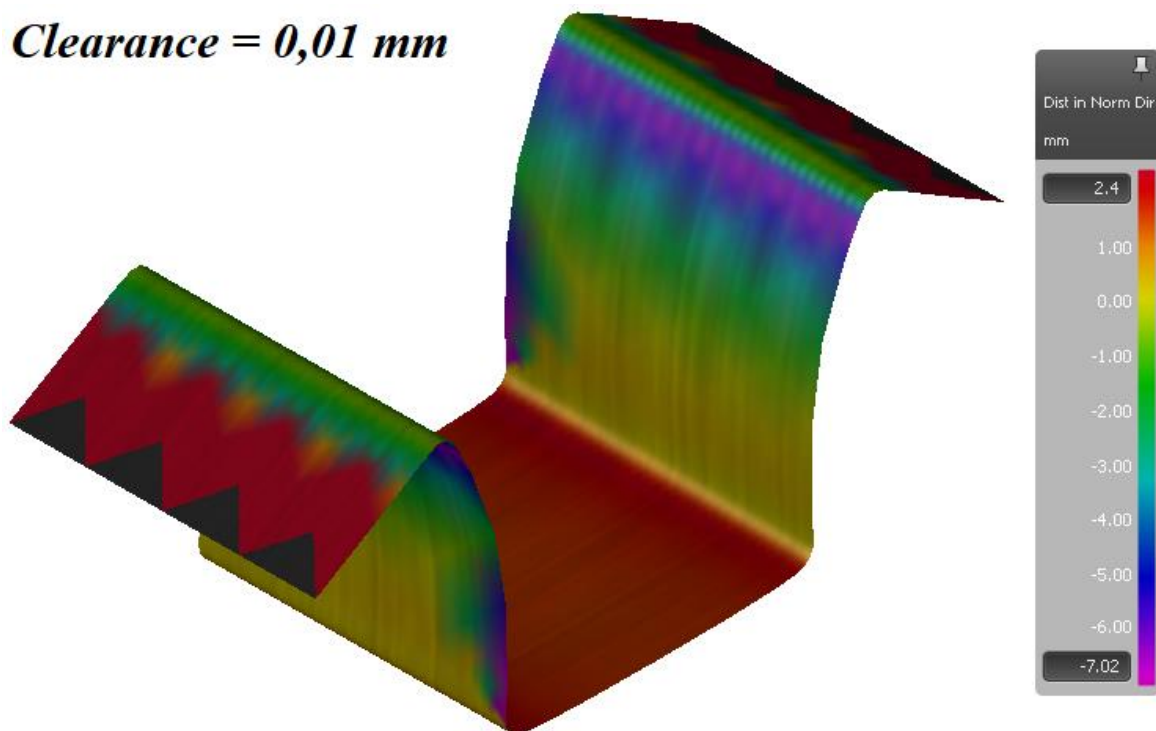


Figura 4.14 Variação do *offset* da ferramenta – estampagem de aço DP980 com *clearance* de 0,01 mm (*offset* = 0,71 mm) (pior resultado)

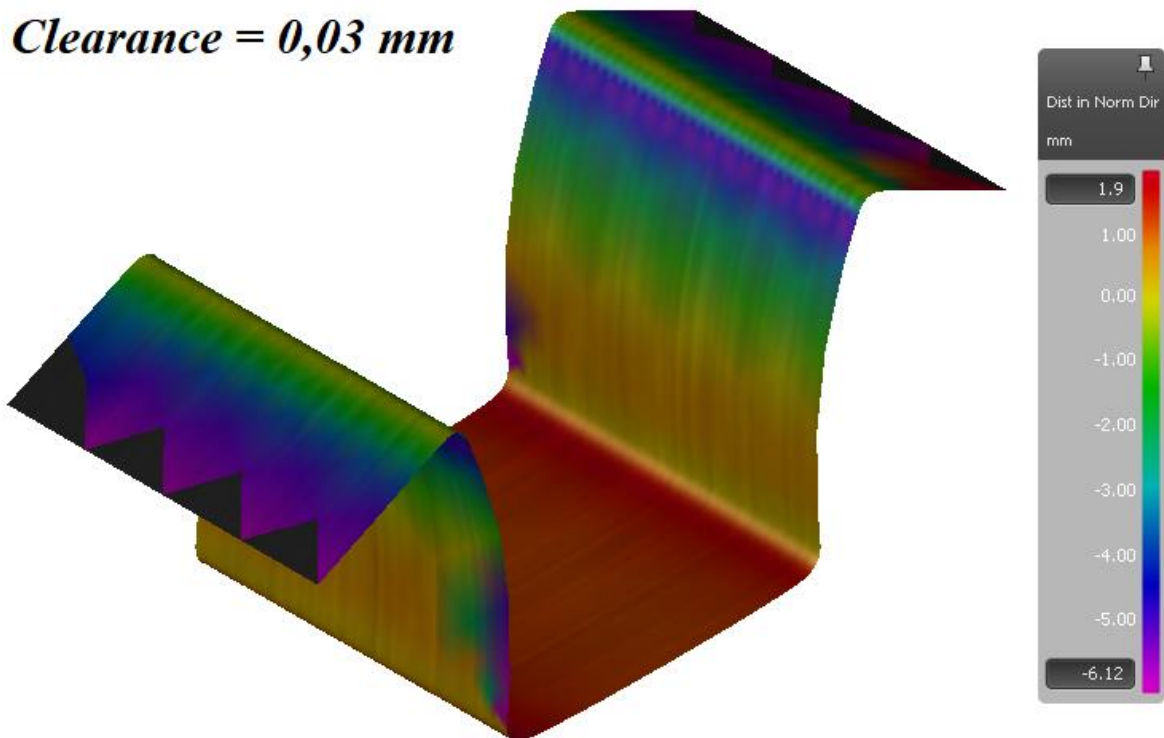


Figura 4.15 Variação do *offset* da ferramenta – estampagem de aço DP980 com *clearance* de 0,03 mm (*offset* = 0,73 mm) (melhor resultado)

Analisando os resultados obtidos para a alteração do *offset* da ferramenta, tal como no parâmetro anterior, não existe uma tendência idêntica para ambos os materiais, ou seja, com o aumento e a diminuição da *clearance* não existe uma relação direta com o aumento ou diminuição dos valores de retorno elástico detetados para ambos os materiais, tendo este parâmetro de ser adaptado à chapa que se está a estampar. No entanto, para o aço DP analisado, existe uma tendência para o melhoramento dos valores de retorno elástico quando o *offset* da ferramenta é aumentado. A conclusão que se pode tirar em relação à alteração deste parâmetro é que o *software* reage a esta mesma alteração, podendo os valores de retorno elástico ser influenciados (negativa ou positivamente). Quando estudado e aplicado convenientemente para o material que se pretende estampar, é um parâmetro que pode melhorar as condições da operação, podendo contribuir para uma melhor execução da peça.

4.2.2.3 Raio de curvatura das dobras da peça

Na variação dos raios de curvatura da peça, os valores de referência de retorno elástico de referência dizem respeito a um raio de 2,5 mm (raio utilizado na análise à variação de lubrificação e do *offset* da ferramenta). Os valores utilizados foram de 0,7 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm e 5 mm e os valores de retorno elástico foram registados para cada uma das peças na Tabela 4.7 e na Tabela 4.8. Mais uma vez, o pior e o melhor resultado para o aço DC06 podem ser vistos na Figura 4.16 e na Figura 4.17, respetivamente, enquanto que mesmos resultados podem ser consultados de igual forma na Figura 4.18 e na Figura 4.19 para o aço DP980.

Tabela 4.7 Valores de retorno elástico em aço DC06 para alteração dos raios de curvatura da peça

DC06				
Raio de curvatura [mm]	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
2,5	-0,76	0,46	1,23	---
0,7	-0,07	0,38	0,45	-63,41
1	-1,16	0,46	1,62	+31,71
2	-0,79	0,41	1,20	-2,44
3	-1,43	0,41	1,84	+49,59
4	-0,70	0,52	1,22	-0,81
5	-1,75	0,38	2,13	+73,17

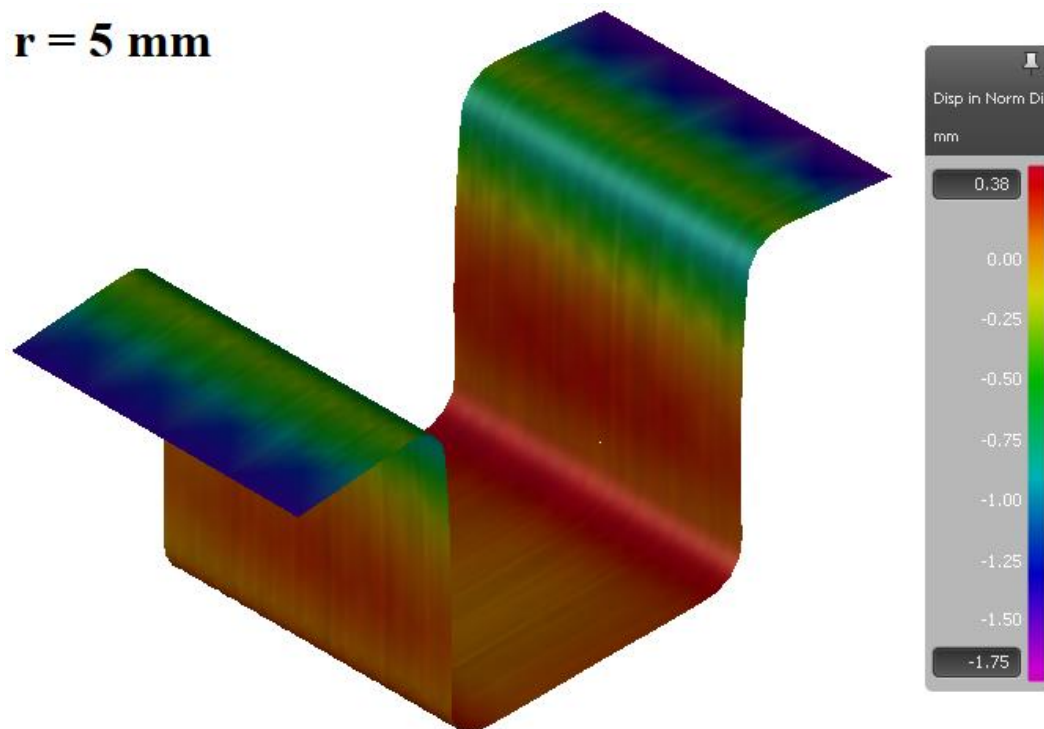


Figura 4.16 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DC06 com raios de 5 mm (pior resultado)

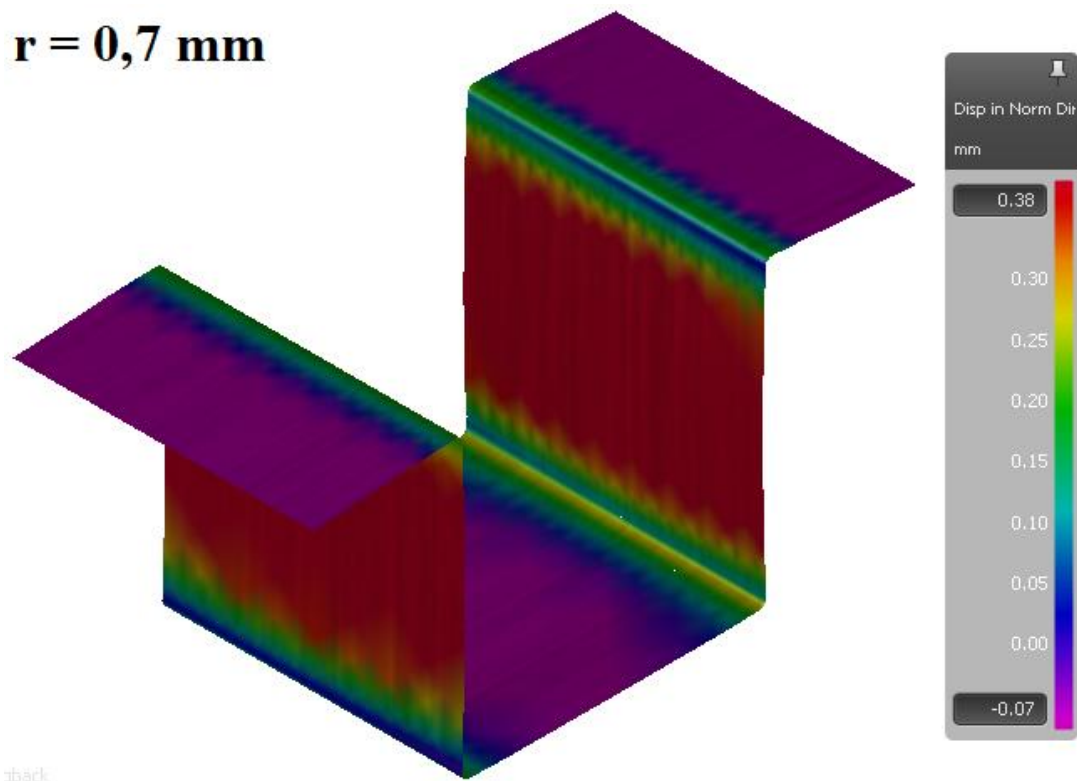


Figura 4.17 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DC06 com raios de 0,7 mm (melhor resultado)

Tabela 4.8 Valores de retorno elástico em aço DP980 para alteração dos raios de curvatura da peça

DP980				
Raio de curvatura [mm]	Retorno elástico (MIN) [mm]	Retorno elástico (MAX) [mm]	Retorno elástico (TOTAL) [mm]	Diferença percentual (%)
2,5	-6,46	1,79	8,25	---
0,7	-6,3	2,29	8,59	+4,12
1	-6,83	2,50	9,33	+13,09
2	-6,24	2,32	8,56	+3,76
3	-6,10	1,97	8,07	-2,18
4	-5,84	1,93	7,77	-5,82
5	-6,07	2,25	8,32	+0,85

$r = 1 \text{ mm}$

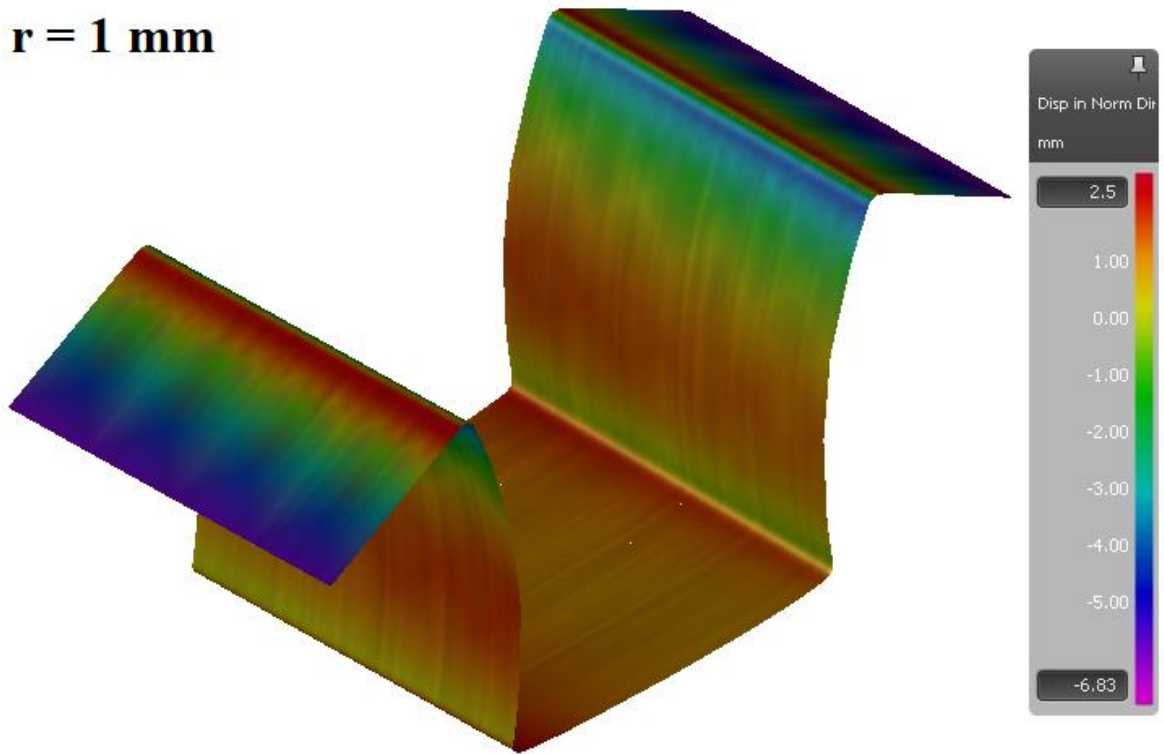


Figura 4.18 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DP980 com raios de 1 mm (pior resultado)

$r = 4 \text{ mm}$

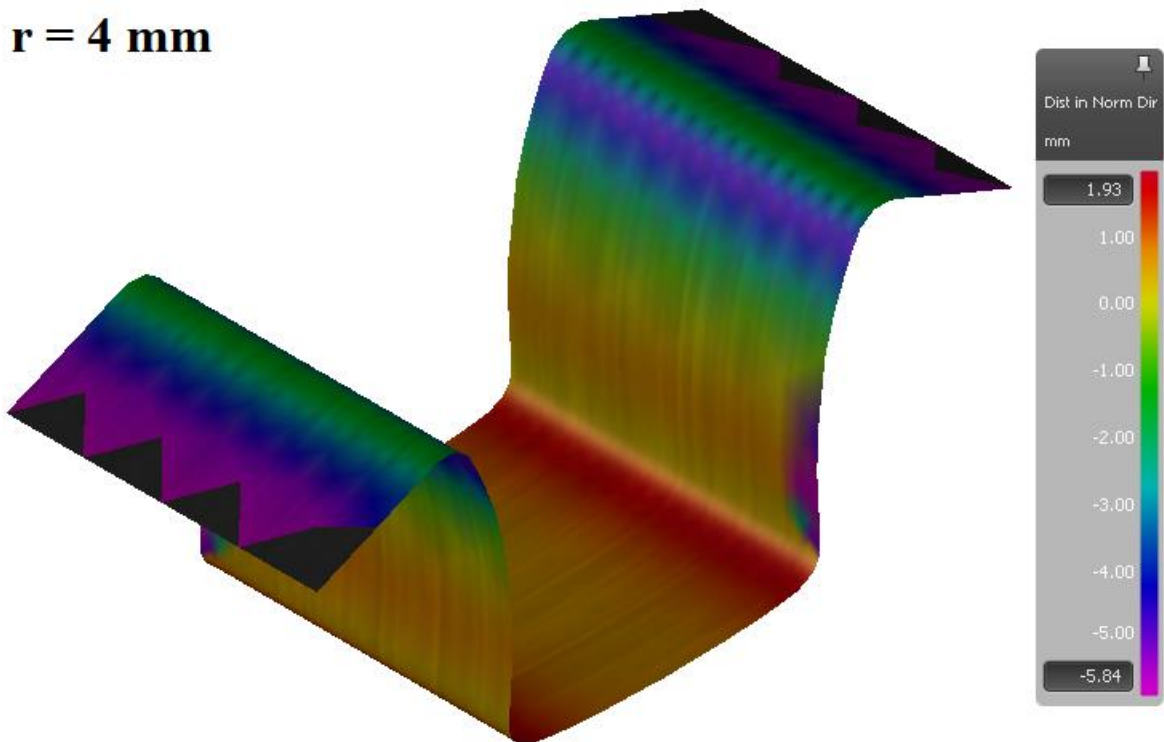


Figura 4.19 Variação dos raios de curvatura da peça – estampagem de peça em aço DP980 com raios de 4 mm (melhor resultado)

Após estas análises preliminares e pouco conclusivas foi decidido passar à análise de uma peça complexa e verificar o seu comportamento em termos de retorno elástico.

5 Caso de estudo

5.1 Peça selecionada e guiamento da chapa na estampagem

Em conjunto com a empresa foi escolhida uma peça (ver Figura 5.1), com a especificação de ser em aço DP, cuja ferramenta ainda se encontrava na fase de projeto para que o processo de estampagem pudesse ser estudado e, através das simulações, perceber como se pode alterar a ferramenta de modo a compensar o retorno elástico.

A peça trata-se de um elemento estrutural do tejadilho de um automóvel e é exigido que esta seja produzida numa chapa de 0,7 mm de espessura de aço DP780.

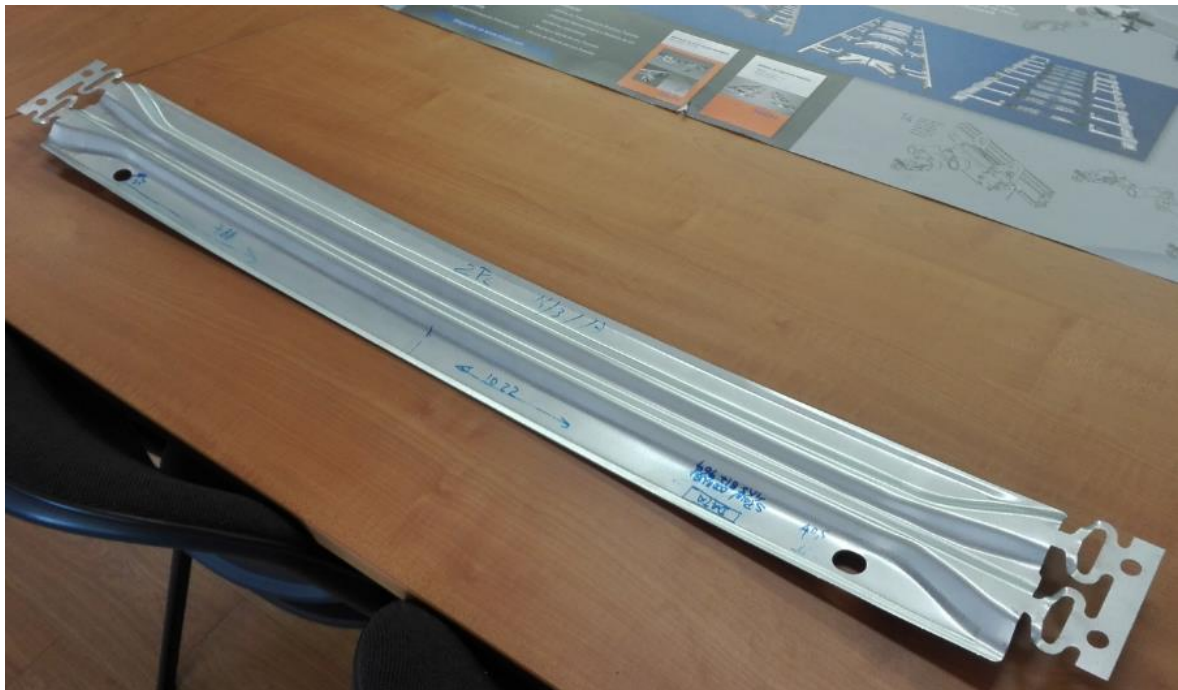


Figura 5.1 Peça estudada na dissertação

Pelo facto desta dissertação se focar apenas no processo de estampagem que permite obter a geometria da peça, as operações de corte que conduzem à obtenção da forma da chapa imediatamente anterior à estampagem da mesma, incluindo a operação que efetua os furos que se apresentam na aba de tamanho superior da peça (operações estas que estão ligadas à ferramenta progressiva) serão ignoradas. Posto isto, de seguida, está ilustrada, na Figura 5.2, a forma da chapa (já cortada) que será estampada para dar forma à peça.



Figura 5.2 Forma da chapa prévia ao processo de estampagem

Na estampagem desta peça, à semelhança do processo descrito na secção anterior desta dissertação, em primeiro lugar, os quatro furos (dois em cada extremidade) são colocados nos pinos guia situados na matriz para que estes garantam o correto posicionamento da chapa na mesma, de seguida, existe um movimento descendente da placa cerra-chapa (que irá assentar nas extremidades quadrangulares onde se encontram os furos), garantindo o encosto da chapa sobre a matriz e, por fim, o movimento descendente do punção que irá forçar o material a ocupar o espaço cada vez mais reduzido entre o mesmo e a matriz. De seguida, na Figura 5.3, é apresentado um esquema relativo às várias fases do processo descrito anteriormente. Na Figura 5.4 é apresentada uma fotografia da ferramenta progressiva que produz a peça em questão, enquanto que na Figura 5.5 está uma fotografia da fita produzida nesta mesma ferramenta.

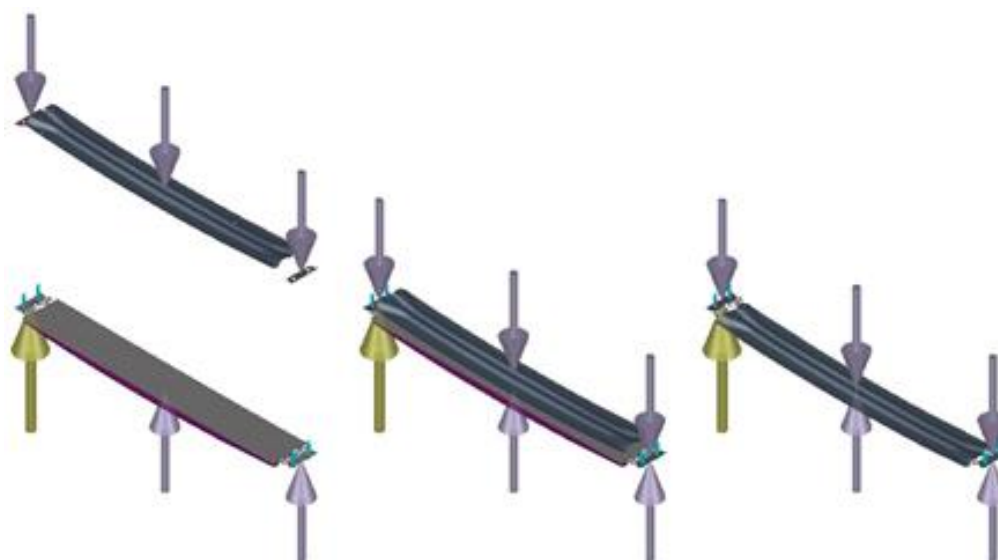


Figura 5.3 Representação esquemática do processo de estampagem do caso de estudo da dissertação

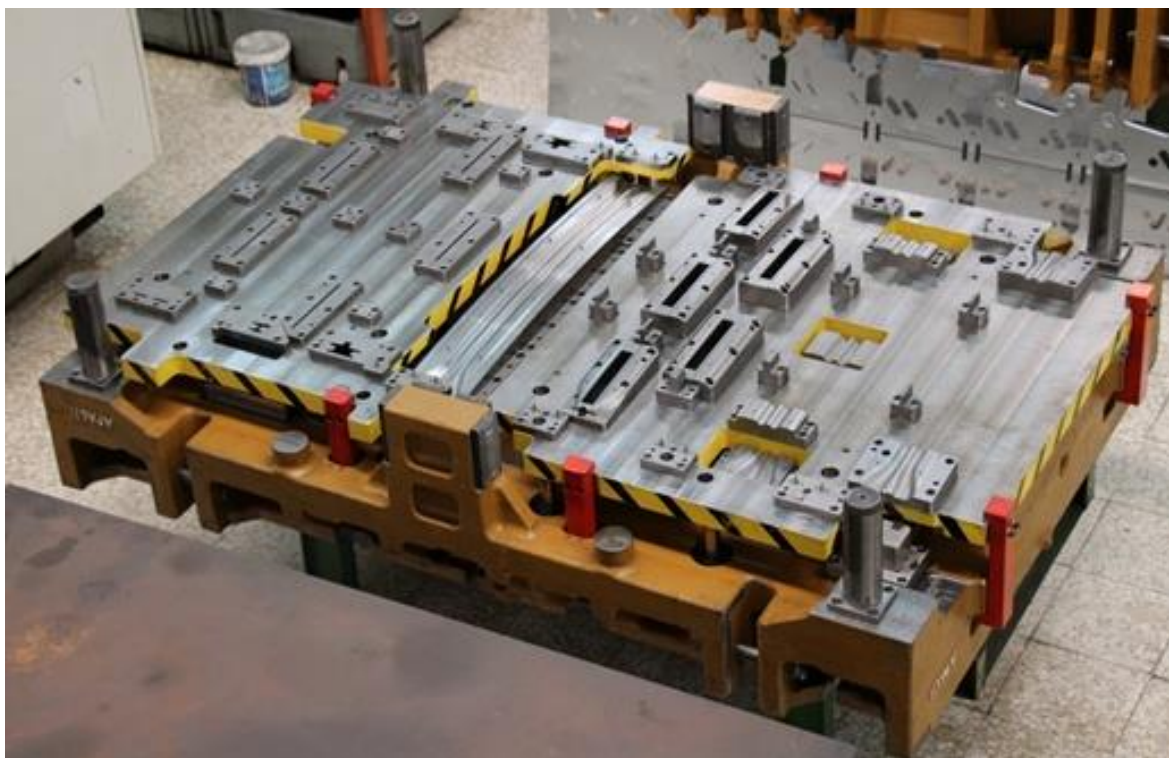


Figura 5.4 Ferramenta progressiva de produção da peça do caso de estudo



Figura 5.5 Fita completa da peça do caso de estudo

5.2 Análise dos desvios geométricos provocados pelo retorno elástico no aço DP780

De maneira a que possam ser realizadas as alterações necessárias à geometria das ferramentas a utilizar para a estampagem de peças em aço DP de modo a reduzir os efeitos do fenómeno de retorno elástico, é importante que, caso a caso, seja feita uma análise dos defeitos provocados por este fenómeno.

A discriminação das várias secções ao longo de todo o comprimento da peça (consultar Figura 5.6) serve de apoio à análise da tipologia dos defeitos. Antes de ser analisada qualquer uma destas secções, a partir da Figura 5.7, é possível apurar que um dos defeitos provocados pelo retorno elástico é a diminuição da curvatura longitudinal da peça. As zonas que se encontram a cinzento em ambas as extremidades da peça representam que existe uma sobreposição da geometria pretendida à geometria obtida, assim como no meio da peça, existe uma sobreposição da zona colorida (pertencente à peça obtida).

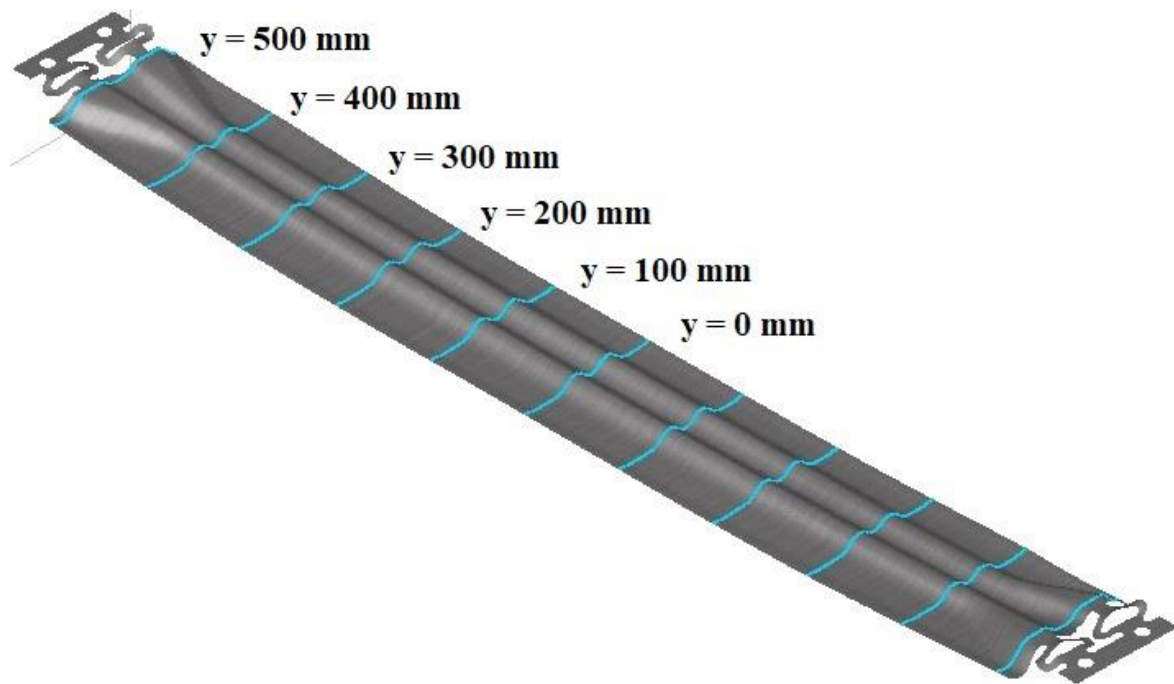


Figura 5.6 Seccionamento da peça do caso de estudo

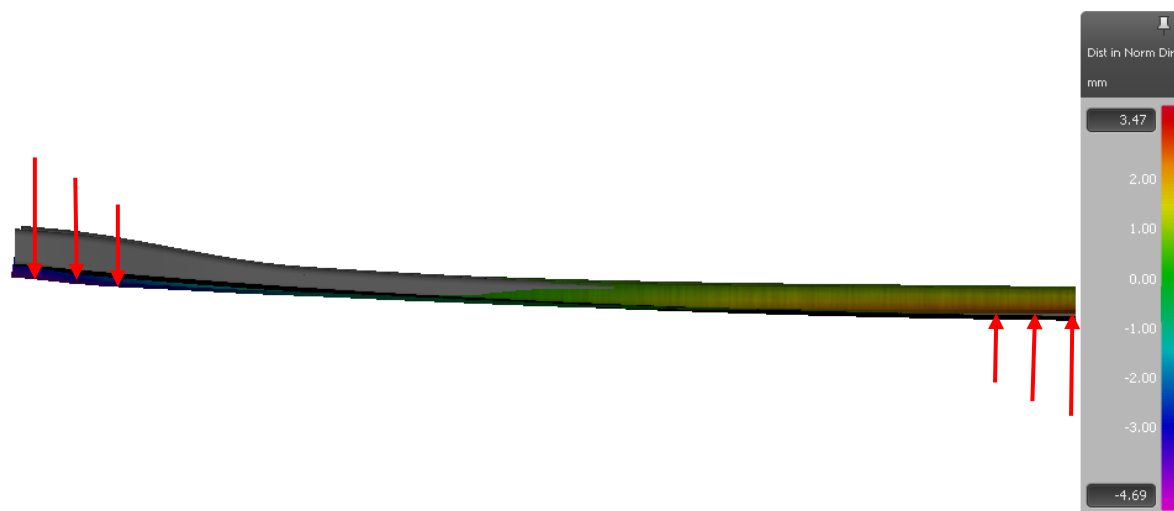


Figura 5.7 Representação esquemática do defeito na curvatura longitudinal da peça do caso de estudo

Em toda a secção transversal da peça, os maiores defeitos observados são uma “abertura” dos dois canais que se estendem ao longo do comprimento da peça, sendo estes ligeiramente mais largos do que o previsto e, no caso das abas laterais que também se estendem ao longo de todo o comprimento da peça, existe uma dificuldade da ferramenta em as executar também, sendo que, em diversas zonas, o material aparenta nem ter sofrido qualquer deformação. Este comportamento do material foi observado presencialmente na fábrica, quando a ferramenta ainda não tinha sido compensada devidamente.

Da Figura 5.8 até à Figura 5.13, estão representadas várias secções da peça estampada em aço DP780 com o valor de retorno em vários pontos específicos, comparando-as com a sua secção homóloga da geometria pretendida, de forma a que os defeitos provocados pelo fenómeno sejam observados mais ao pormenor.

Analisando os defeitos observados nas imagens apresentadas, é possível concluir que tem de existir uma compensação total da ferramenta, ou seja, transversal e longitudinal. A peça apresentada não exibe uma geometria que seja fácil de alterar pormenor a pormenor, de modo a que se consiga deduzir uma relação causa-efeito sobre as alterações realizadas.

Secção y = 500 mm

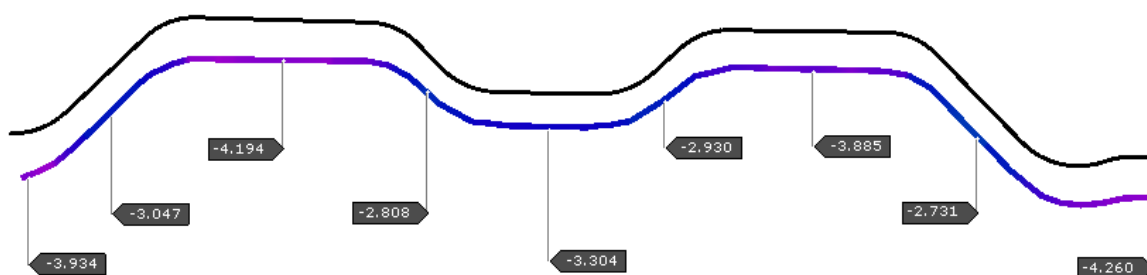


Figura 5.8 Secção y = 500 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

Secção y = 400 mm

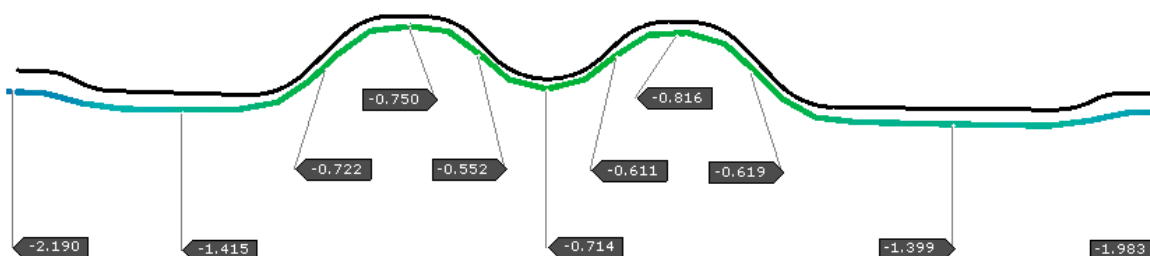


Figura 5.9 Secção y = 400 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

Secção y = 300 mm

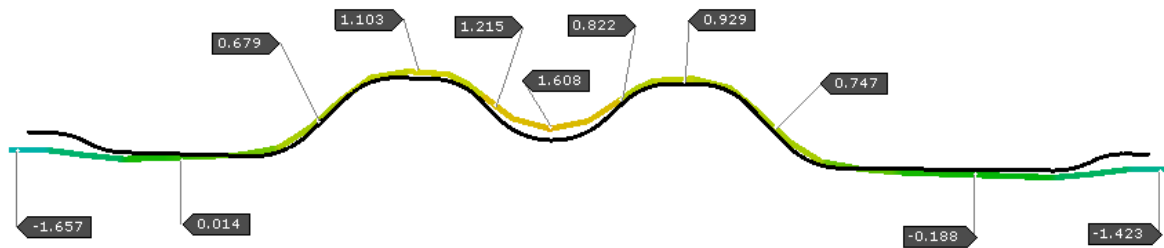


Figura 5.10 Secção y = 300 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

Secção y = 200 mm

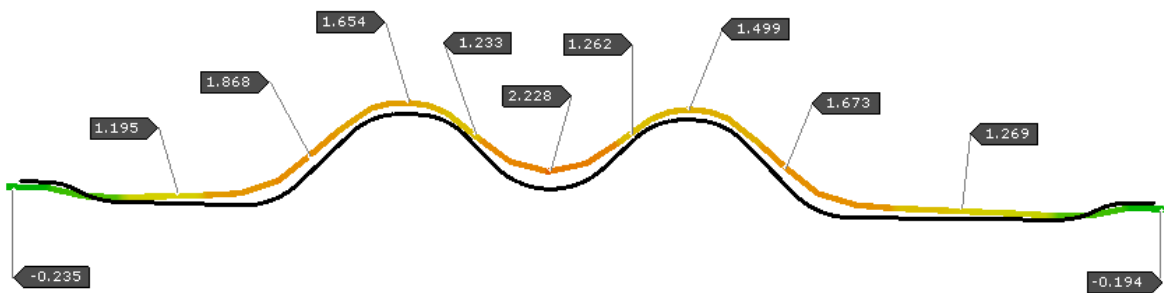


Figura 5.11 Secção y = 200 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

Secção y = 100 mm

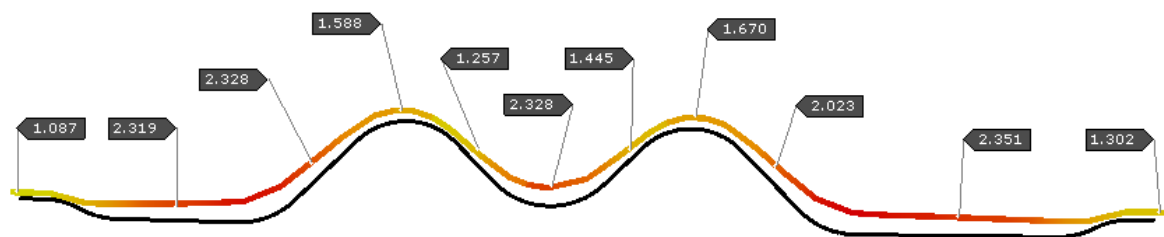


Figura 5.12 Secção y = 100 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

Secção y = 0 mm

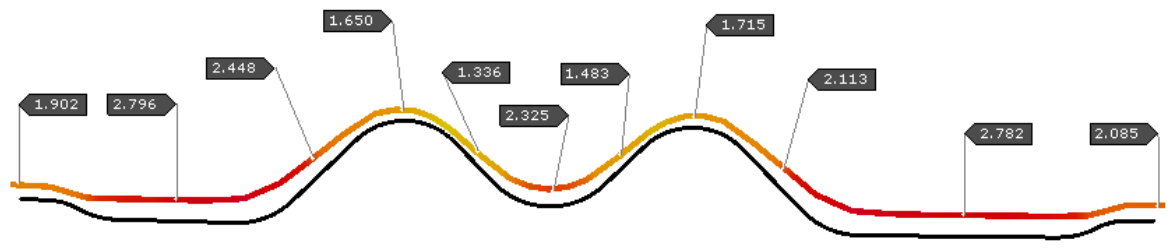


Figura 5.13 Secção y = 0 mm da peça em aço DP780 estampada com a ferramenta sem compensação

A constatação deste facto e também porque muitas das peças na indústria produzidas por estampagem possuem esta mesma característica (a falta de simplicidade no que toca a pormenores geométricos), levou a que a abordagem metodológica da dissertação fosse diferente. A abordagem inicial idealizada, seria a de focar os pormenores geométricos isoladamente e, para cada um deles, ser feita a compensação necessária de modo a obter o melhor resultado. Tendo em conta que esta hipótese se torna pouco viável devido ao facto de ser difícil estabelecer a relação causa-efeito e de que, ao alterar um pormenor geométrico numa zona específica da ferramenta, essa alteração poderá causar defeitos numa zona diferente da peça, a abordagem à compensação da ferramenta terá de ser feita como um todo. Com isto, todas as alterações necessárias à ferramenta serão feitas em simultâneo, obtendo assim uma ferramenta que produza um melhor resultado sem ter de ser analisado cada pormenor separadamente.

O *software* de simulação que foi utilizado no decorrer desta dissertação possui uma funcionalidade que permite que esta compensação total da ferramenta seja feita rapidamente, manipulando apenas dois fatores inerentes ao algoritmo que o programa usa ao realizar esta função. Na secção seguinte, está apresentada uma breve explicação do efeito destes fatores na geometria da peça.

5.3 Compensação da ferramenta

Toda a informação apresentada neste subcapítulo, assim como as figuras que nele se inserem, foram retiradas do *site* de assistência do programa de simulação de estampagem.

Numa fase inicial da compensação da ferramenta que é o caso de estudo da presente dissertação, é importante saber quais os valores de retorno elástico com que se está a lidar, para que estes possam ser devidamente compensados e irem ao encontro das tolerâncias estabelecidas quando a peça foi projetada. Para o efeito, é necessário referir que, no projeto da peça, é especificada uma tolerância de forma de superfície de 0,3 mm nas zonas em que existe contato com outras superfícies. Assim sendo, foi esta a tolerância imposta como base para a compensação da ferramenta no trabalho realizado nesta dissertação.

Na Figura 5.14 e, até à Figura 5.20, que são respeitantes à escala de cores associada aos valores de retorno elástico da peça que irão estar apresentadas doravante, a escala está apresentada

de maneira diferente da que havia sido apresentada nas secções anteriores. A diferença é que a escala passa a apresentar apenas o valor máximo de retorno elástico total no extremo inferior, apresentando valores muito próximos do zero no extremo superior, querendo isto dizer que a peça alcançada através do processo de estampagem estará sempre abaixo da geometria de referência. Esta alteração serve apenas para facilitar a visualização da evolução do valor de retorno elástico com as compensações feitas na ferramenta.

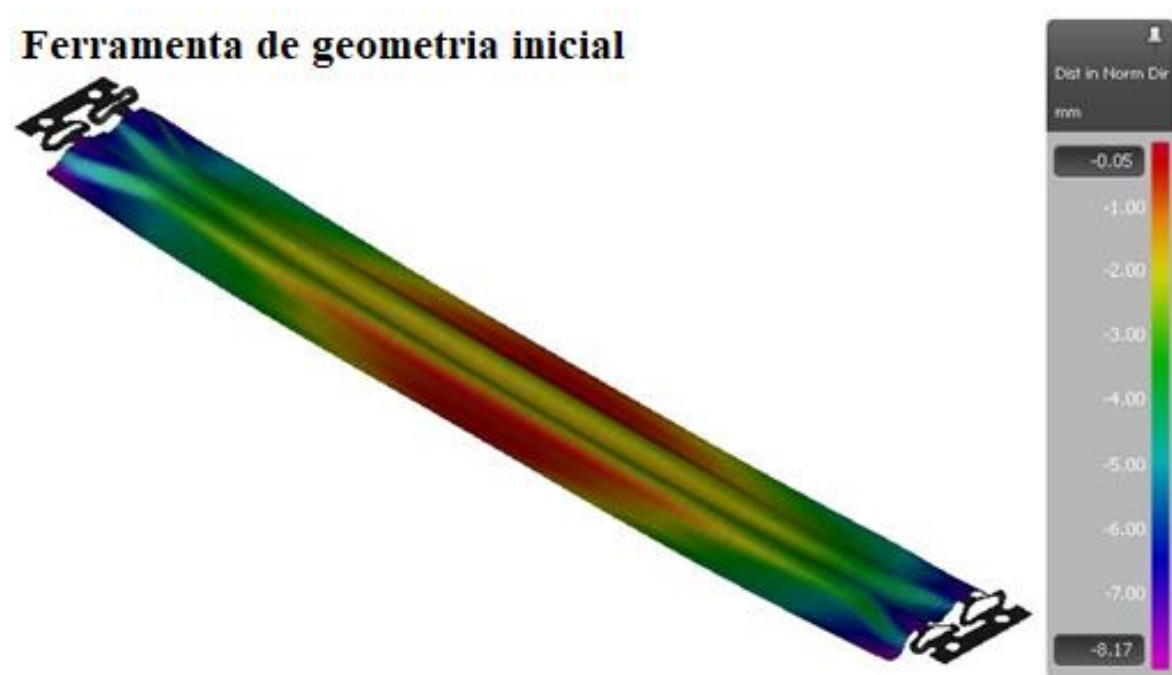


Figura 5.14 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta igual à geometria pretendida

A compensação de ferramentas no programa utilizado assenta num conceito de *overbend* da peça tendo como base o resultado de retorno elástico simulado anteriormente. O programa deriva um campo vetorial a partir do retorno elástico simulado e cada um dos vetores representa a diferença entre antes e depois do fenómeno acontecer de um ponto específico da peça. O módulo de compensação inverte este campo vetorial representando assim os novos vetores os pontos da geometria da ferramenta compensada, calculando de seguida qual a nova forma da geometria. Na Figura 5.21, é possível observar um esquema que explica o raciocínio por trás deste módulo de compensação do programa utilizado.

Geometria inicial
Secção y = 500 mm

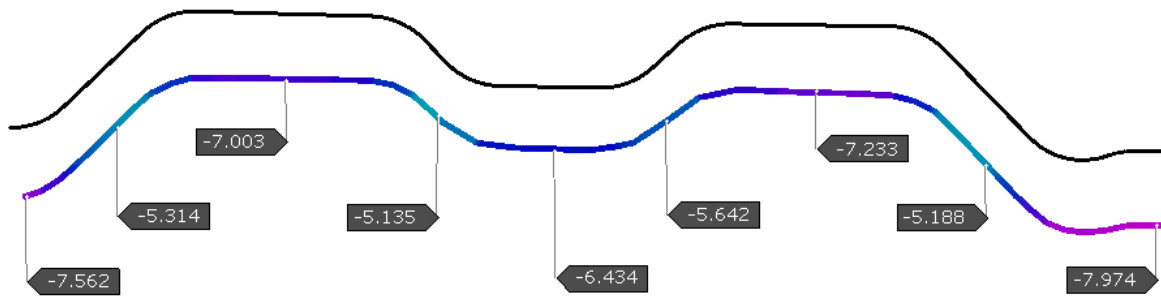


Figura 5.15 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 500 mm

Geometria inicial
Secção y = 400 mm

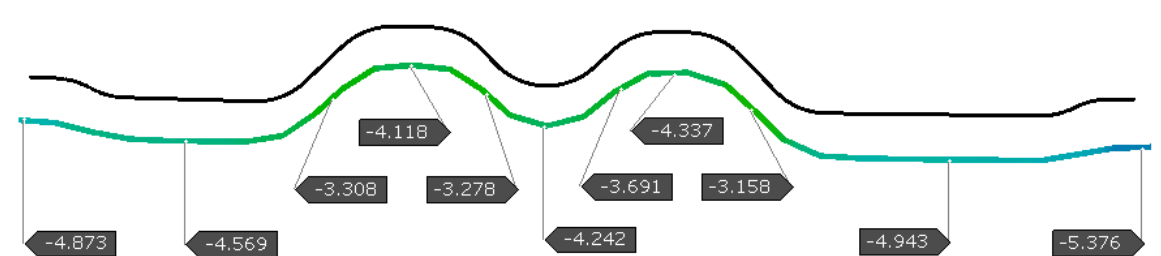


Figura 5.16 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 400 mm

Geometria inicial
Secção y = 300 mm

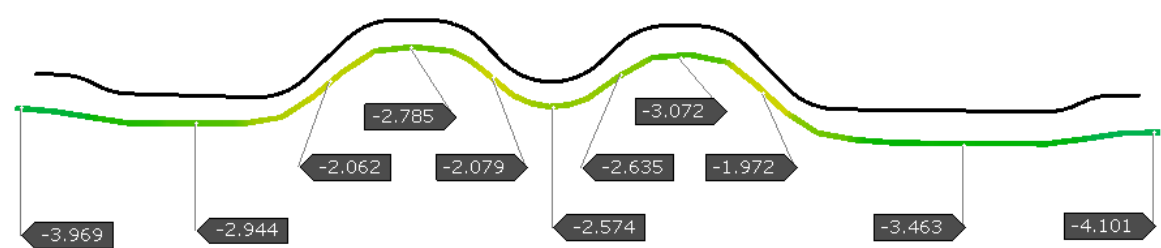


Figura 5.17 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 300 mm

Geometria inicial
Secção y = 200 mm

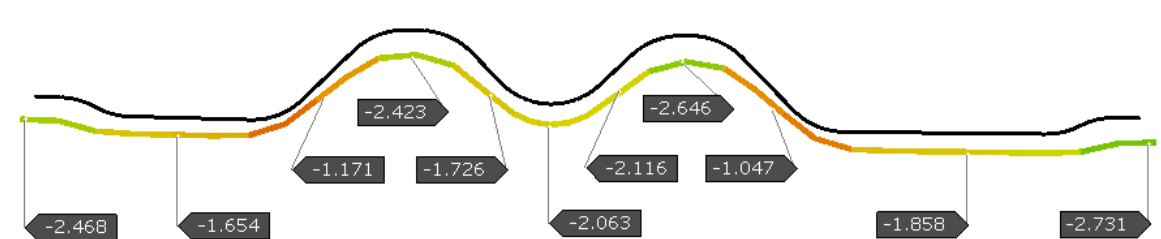


Figura 5.18 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 200 mm

Geometria inicial Secção y = 100 mm

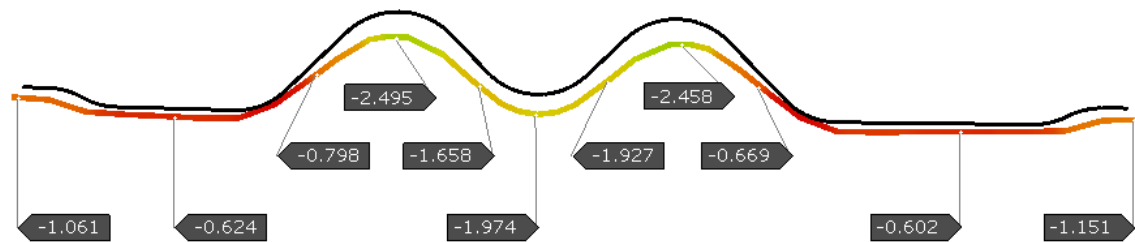


Figura 5.19 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 100 mm

Geometria inicial Secção y = 0 mm

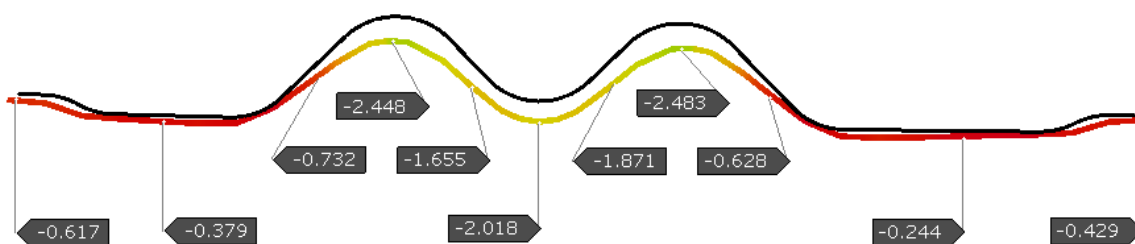


Figura 5.20 Caso de estudo - Geometria inicial: secção y = 0 mm

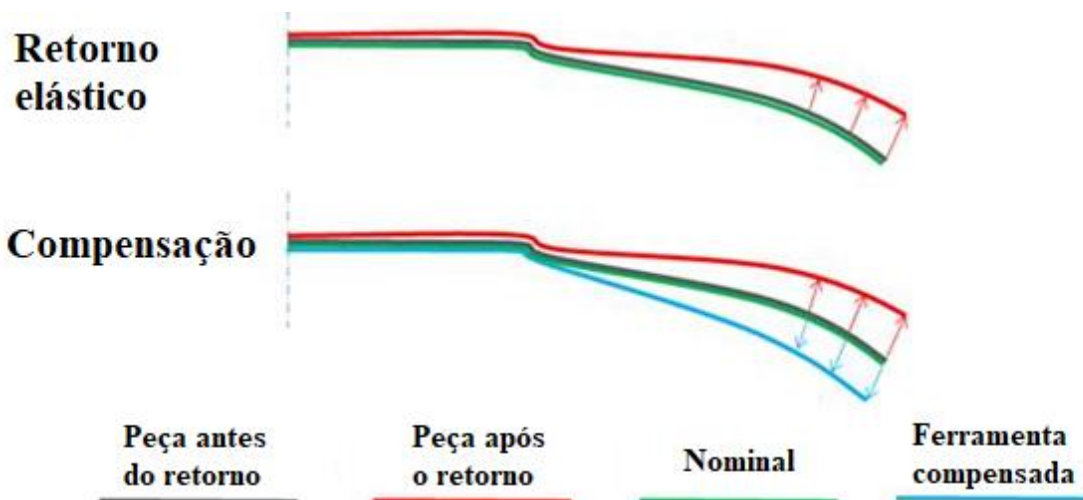


Figura 5.21 Representação esquemática do módulo de compensação do programa de simulação

Sendo os resultados da compensação baseados em valores de retorno elástico simulados anteriormente, quanto mais verídicos são estes resultados, melhor será a compensação dada à ferramenta. Dito isto, o conselho dos fabricantes do programa é que este módulo de compensação seja utilizado com a geometria em CAD perfeitamente de acordo com o projeto, ou seja, o desenho da peça deve estar finalizado para que, ao utilizar a geometria compensada como base para prototipagem e maquinação dos componentes da ferramenta, os resultados de retorno elástico sejam o mais aproximados possível.

Por outro lado, sendo que o programa também pode ser utilizado para o desenho dos componentes da ferramenta, é possível utilizar o módulo de compensação para que o desenho da peça possa ser devidamente adaptado ao resultado de retorno elástico obtido, obtendo uma geometria mais eficiente nesse sentido, evitando algumas intervenções futuras na ferramenta.

5.3.1 Parâmetros usados na compensação da ferramenta

- *Compensation factor*

Ao fazer a compensação é possível utilizar o valor de *compensation factor* para quantificar valor de retorno elástico, calculado na simulação com a ferramenta de geometria inicial, que é tido em conta para a compensação da mesma. Este valor, segundo a indicação de pessoal experiente na utilização do programa, deve ser mantido entre 0,7 e 1,2 pois é entre estes valores que, normalmente, o programa encontra a geometria da ferramenta que irá compensar da melhor maneira possível o fenómeno de retorno elástico.

- *Smoothing control*

Para que seja feita a compensação da ferramenta, o programa calcula o campo vetorial de compensação que deriva do campo vetorial de retorno elástico calculado através da geometria inicial. Este campo vetorial de compensação é tido em conta para o desenvolvimento das superfícies da nova ferramenta. O parâmetro *smoothing control* é responsável pela complexidade matemática da função de cálculo do campo vetorial. Quanto mais alto é este valor, maior é a complexidade, da seguinte forma:

- **0 (*smooth*):** a superfície da ferramenta resultante da compensação pode desviar um pouco do campo vetorial de compensação. No entanto, certos defeitos locais que podem ocorrer nas superfícies, como pequenas ondulações, são aliviadas (pois há um maior afastamento do campo vetorial de compensação que deriva do campo vetorial do retorno elástico);
- **1 (*accurate*):** a superfície da ferramenta resultante permanecerá muito próxima do campo do vetor de compensação. Também os efeitos de retorno elástico locais serão visíveis nas superfícies de ferramentas compensadas (pois há uma maior aproximação ao campo vetorial de compensação que deriva do campo vetorial do retorno elástico).

Para o *smoothing control*, é aconselhável o uso de valores baixos quando existem áreas extensas da peça em que o retorno elástico provoque ondulações na superfície e em pequenos pormenores geométricos em que os efeitos do fenómeno persistam, podendo assim suavizar o efeito. O uso de valores mais elevados é aconselhável para suavizar efeitos locais do fenómeno de retorno elástico de maneira mais precisa. Na Figura 5.22, está representado um esquema de auxílio do efeito que o *smoothing control* tem quando é aplicado.

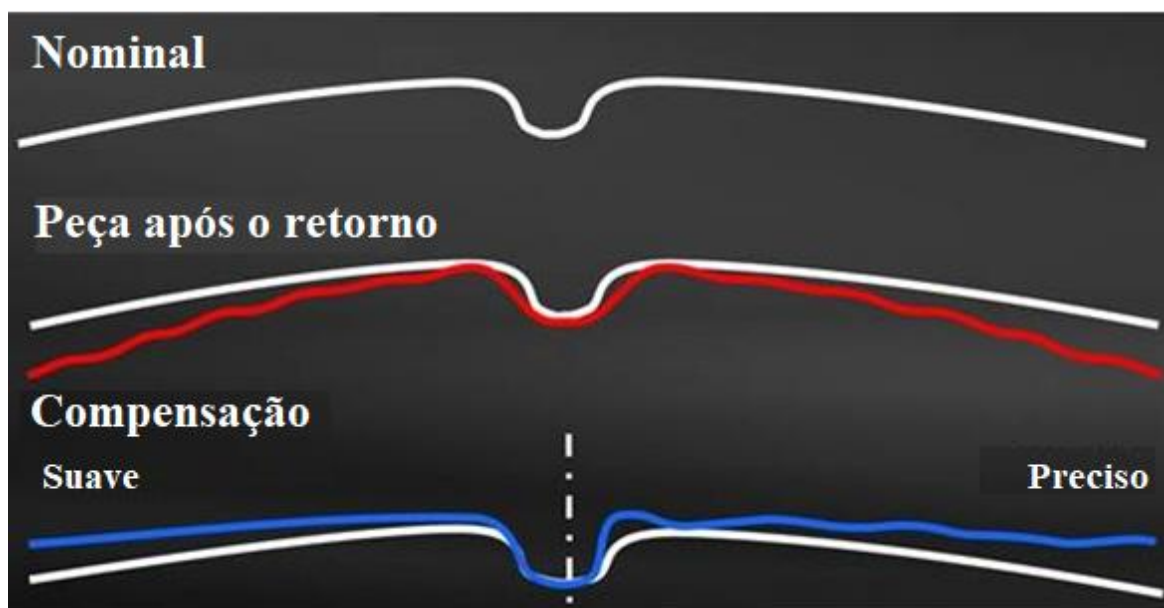


Figura 5.22 Efeito do parâmetro *smoothing control* na compensação de ferramentas

A curva branca representa a geometria antes de ocorrer o retorno elástico, enquanto a curva vermelha mostra a forma após o mesmo ocorrer. A forma da curva azul representa a ferramenta compensada dependente valor dado ao parâmetro. À esquerda, a compensação suave ajuda a eliminar o defeito de ondulação, mas, por outro lado, o pequeno defeito provocado pelo retorno elástico no centro não é compensado o suficiente. Apenas a tendência geral do fenômeno é levada em consideração. À direita, a compensação precisa é mais útil para realizar o *overbend* na área central de uma forma mais detalhada (mais ao encontro do campo vetorial do retorno elástico, como já havia sido explicado), mas também o resto da peça possui uma estrutura detalhada, ou seja, a ondulação proveniente da simulação inicial provoca também ondas na ferramenta compensada.

Após a análise dos parâmetros do programa envolvidos na compensação de ferramentas, foram realizadas várias iterações no sentido de diminuir o valor de retorno elástico conseguido nas simulações de estampagem da peça do caso de estudo. Nestas iterações, que serão apresentadas de seguida, foram feitas várias combinações de valores para estes parâmetros e foi analisado qual o efeito que estes parâmetros foram tendo na ferramenta e, por conseguinte, na geometria da peça conseguida, comparando-a com o resultado obtido anteriormente e com a geometria inicial, até se chegar a um resultado de retorno elástico que não possa ser melhorado através destes parâmetros.

De seguida, na Figura 5.23 que é acompanhada da Tabela 5.1, e recordando a metodologia abordada nesta dissertação (ver Figura 1.2), está apresentado um esquema que tem como objetivo explicar o raciocínio do processo iterativo utilizado, em específico, para o caso de estudo.

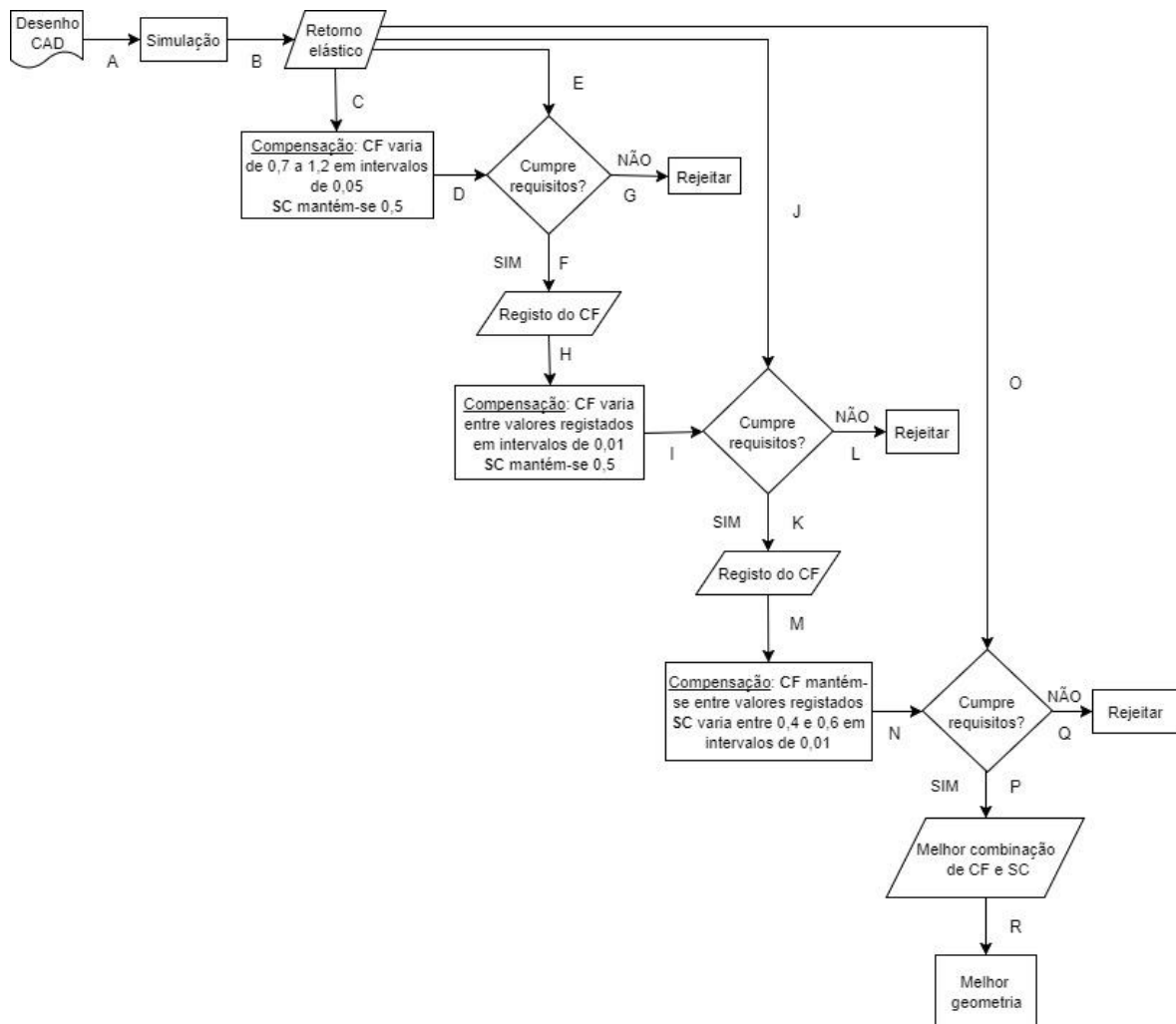


Figura 5.23 Representação esquemática do processo iterativo de compensação da ferramenta

Tabela 5.1 Auxílio à leitura da representação esquemática do processo iterativo de compensação da ferramenta

Designação	Ação correspondente
A	Realização da simulação de estampagem da peça com ferramenta de geometria nominal da peça
B	Registar qual o valor do retorno elástico máximo obtido na simulação
C	Utilizar geometria nominal da peça e o resultado da simulação (retorno elástico) para a realização das iterações de compensação
D	Registar o valor de retorno elástico obtido para cada iteração
E	Resultado da primeira simulação é utilizado como termo de comparação para os novos valores de retorno elástico

F	Valor de retorno elástico apresenta uma redução igual ou superior a 65% do valor da primeira simulação
G	Valor de retorno elástico não apresenta uma redução igual ou superior a 65% do valor da primeira simulação
H	Utilizar valores registados de CF (como intervalo) entre os quais serão realizadas as iterações seguintes
I	Registar o valor de retorno elástico obtido para cada iteração
J	Resultado da primeira simulação é utilizado como termo de comparação para os novos valores de retorno elástico
K	Valor de retorno elástico apresenta uma redução igual ou superior a 70% do valor da primeira simulação
L	Valor de retorno elástico não apresenta uma redução igual ou superior a 70% do valor da primeira simulação
M	Utilizar valores registados de CF para as iterações seguintes
N	Registar o valor de retorno elástico obtido para cada iteração
O	Resultado da primeira simulação é utilizado como termo de comparação para os novos valores de retorno elástico
P	Valor de retorno elástico apresenta uma redução igual ou superior a 80% do valor da primeira simulação
Q	Valor de retorno elástico não apresenta uma redução igual ou superior a 80% do valor da primeira simulação
R	Analisar qual das iterações obteve o menor valor de retorno elástico

5.3.2 Primeira fase de iterações de compensação

Numa primeira fase de simulações de compensação da ferramenta, foram feitas várias iterações em que o foco estava apenas na modificação do parâmetro *compensation factor* (doravante designado por CF), mantendo o *smoothing control* (doravante designado por SC) a 0,5 (valor *default* do programa). Nestas primeiras simulações, o CF foi feito variar de 0,05 entre 0,7 e 1,2 de forma a encontrar quais os valores que levariam a uma ferramenta que executaria a peça com o melhor valor de retorno elástico possível. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Valores obtidos na 1ª fase de iterações de compensação

<i>Compensation factor</i>	<i>Smoothing control</i>	Retorno elástico máximo [mm]	Diferença percentual [%]
0,70	0,50	2,64	-67,69%
0,75	0,50	2,38	-70,87%
0,80	0,50	2,23	-72,71%
0,85	0,50	2,35	-71,24%
0,90	0,50	2,40	-70,62%
0,95	0,50	2,62	-67,93%
1,00	0,50	4,28	-47,61%
1,05	0,50	4,00	-51,04%
1,10	0,50	3,59	-56,06%
1,15	0,50	3,77	-53,86%
1,20	0,50	4,68	-42,72%

Analisando os valores de retorno elástico obtidos, é possível concluir que o programa foi bastante eficaz na redução do fenómeno pois, salvo duas exceções, todos os valores obtidos apresentam uma redução do valor inicial (8,17 mm) superior a 50%. Para que se pudesse prosseguir para as iterações seguintes, foi estabelecido que apenas se utilizariam CF's cujo valor de retorno elástico conseguido anteriormente tivesse uma redução igual ou superior a 65% do valor inicial obtido. Assim sendo, valores de CF superiores aos que estão destacados a vermelho não foram utilizados nas iterações seguintes.

De modo a tornarem-se perceptíveis as mudanças que acontecem na ferramenta quando esta é submetida a uma compensação, da Figura 5.24 à Figura 5.29 estão apresentadas as diferentes secções da ferramenta comparando a geometria nominal, com a iteração que obteve o pior resultado de retorno elástico (CF = 1,20 – **Iteração 1**) e com a que obteve o melhor resultado (CF = 0,80 – **Iteração 2**).

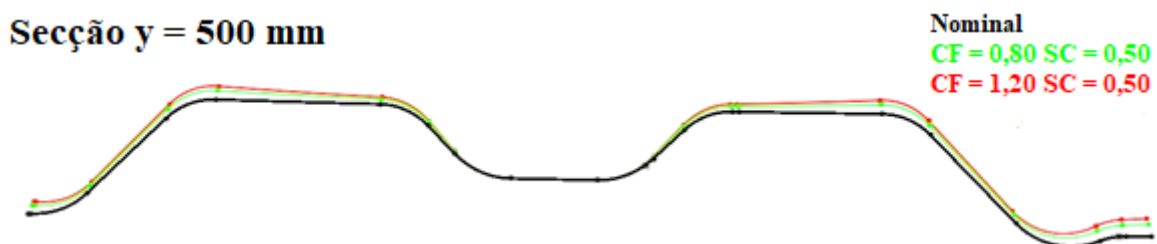


Figura 5.24 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 500 mm

Secção y = 400 mm

Nominal
CF = 0,80 SC = 0,50
CF = 1,20 SC = 0,50



Figura 5.25 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 400 mm

Secção y = 300 mm

Nominal
CF = 0,80 SC = 0,50
CF = 1,20 SC = 0,50

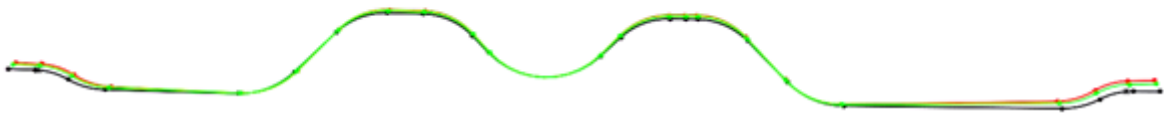


Figura 5.26 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 300 mm

Secção y = 200 mm

Nominal
CF = 0,80 SC = 0,50
CF = 1,20 SC = 0,50



Figura 5.27 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 200 mm

Secção y = 100 mm

Nominal
CF = 0,80 SC = 0,50
CF = 1,20 SC = 0,50



Figura 5.28 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 100 mm

Secção y = 0 mm

Nominal
CF = 0,80 SC = 0,50
CF = 1,20 SC = 0,50

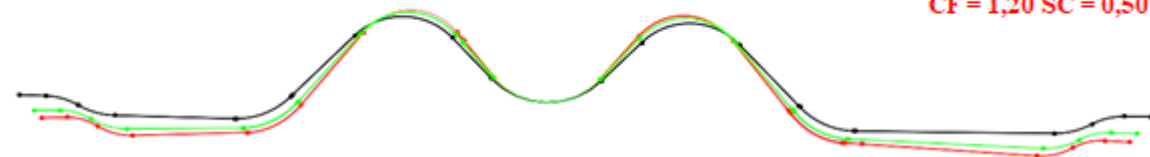


Figura 5.29 1ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm

Como se pode perceber pela observação das secções representadas, o parâmetro *compensation factor* tem uma influência total em toda a alteração transversal da superfície da ferramenta. As alterações que são feitas à ferramenta são da mesma natureza, mesmo usando valores diferentes

para este parâmetro. Assim sendo, e complementando a explicação que já havia sido dada anteriormente, este parâmetro serve para intensificar as alterações que são feitas na ferramenta, no sentido de contrariar o campo vetorial do retorno elástico.

Neste caso em concreto, é intensificada a dobra nas abas laterais da peça para que, quando esta recupera, vá de encontro – com maior precisão – à geometria nominal pretendida. Nos canais centrais que se encontram ao longo de toda a peça, o espaço torna-se mais estreito, exatamente pela mesma razão referida para as dobras laterais. Uma outra alteração que também é executada é a elevação das extremidades longitudinais da ferramenta para que a curvatura seja corrigida.

Os resultados de ambas as simulações estão representados para cada uma das secções avaliadas da Figura 5.30 à Figura 5.36 para a Iteração 1 e da Figura 5.37 à Figura 5.43 para a Iteração 2.

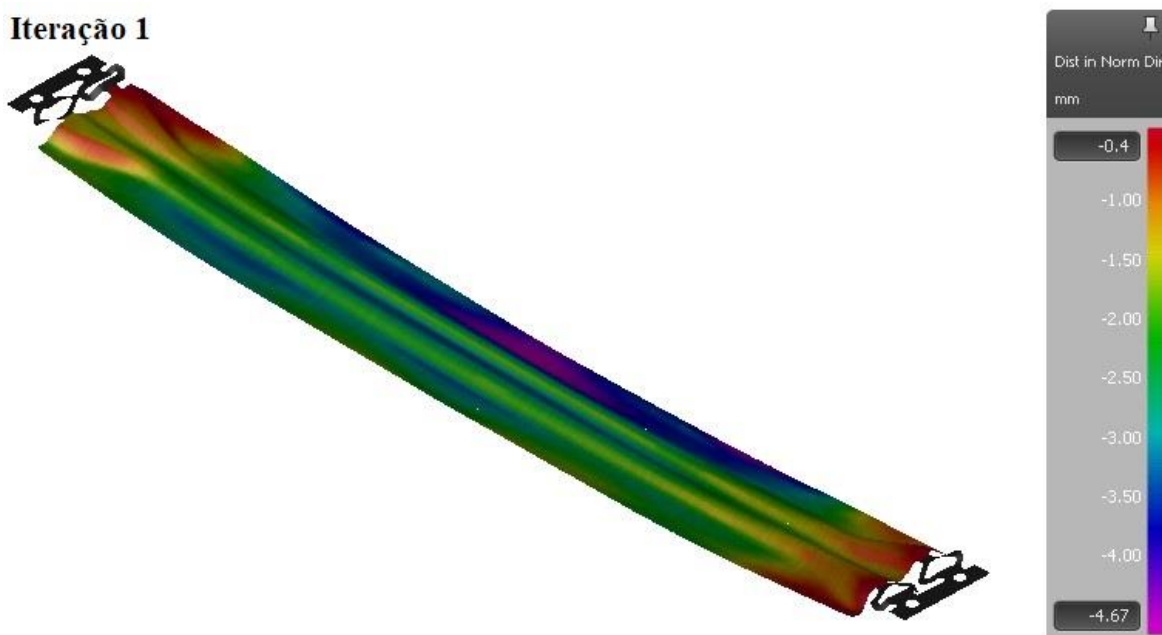


Figura 5.30 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 1

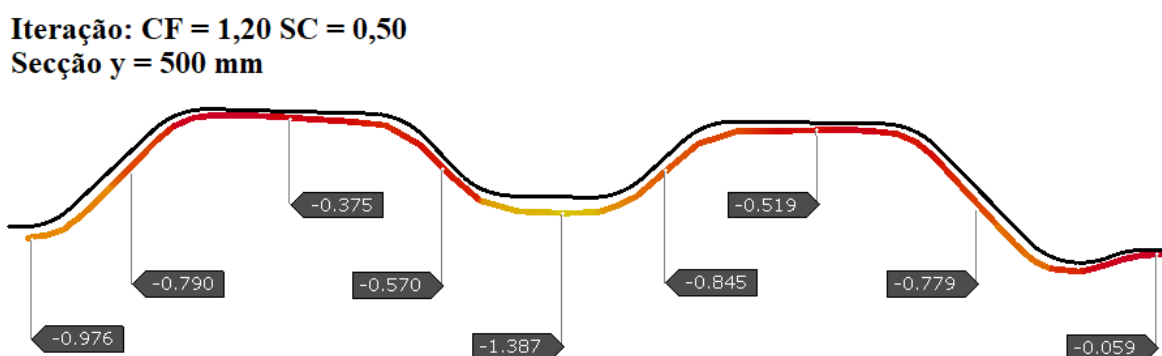


Figura 5.31 Iteração de compensação 1: Secção y = 500 mm

Iteração: CF = 1,20 SC = 0,50 mm
Secção y = 400 mm

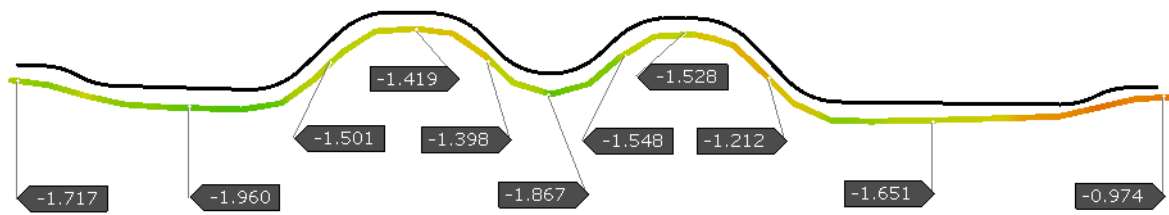


Figura 5.32 Iteração de compensação 1: Secção y = 400 mm

Iteração: CF = 1,20 SC = 0,50
Secção y = 300 mm

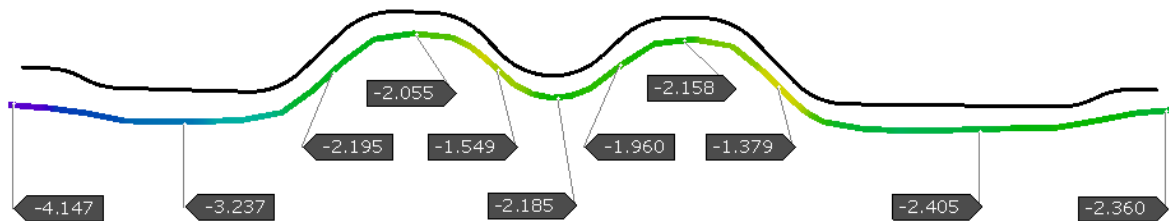


Figura 5.33 Iteração de compensação 1: Secção y = 300 mm

Iteração: CF = 1,20 SC = 0,50
Secção y = 200 mm

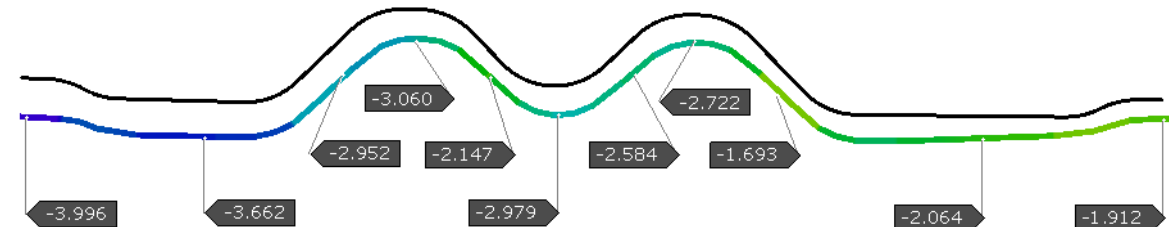


Figura 5.34 Iteração de compensação 1: Secção y = 200 mm

Iteração: CF = 1,20 SC = 0,50
Secção y = 100 mm

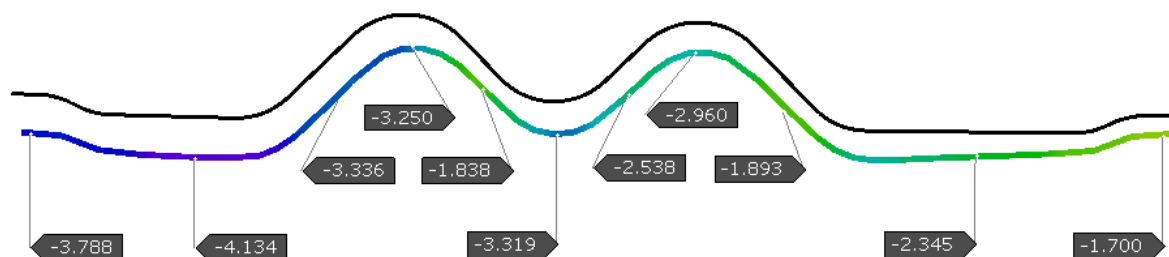


Figura 5.35 Iteração de compensação 1: Secção y = 100 mm

Iteração: CF = 1,20 SC = 0,50
Secção y = 0 mm

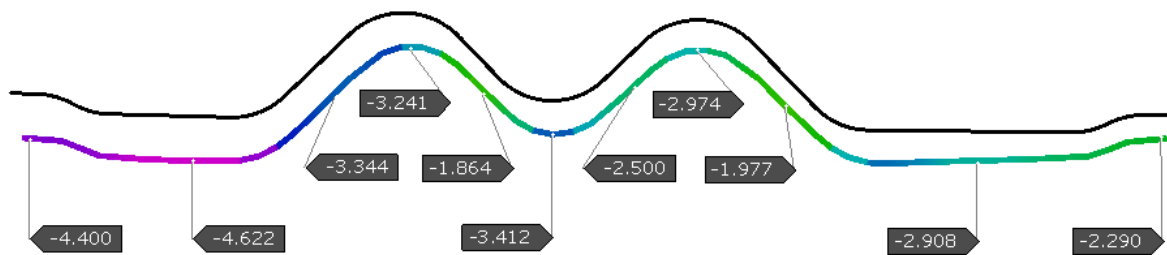


Figura 5.36 Iteração de compensação 1: Secção y = 0 mm

Iteração 2

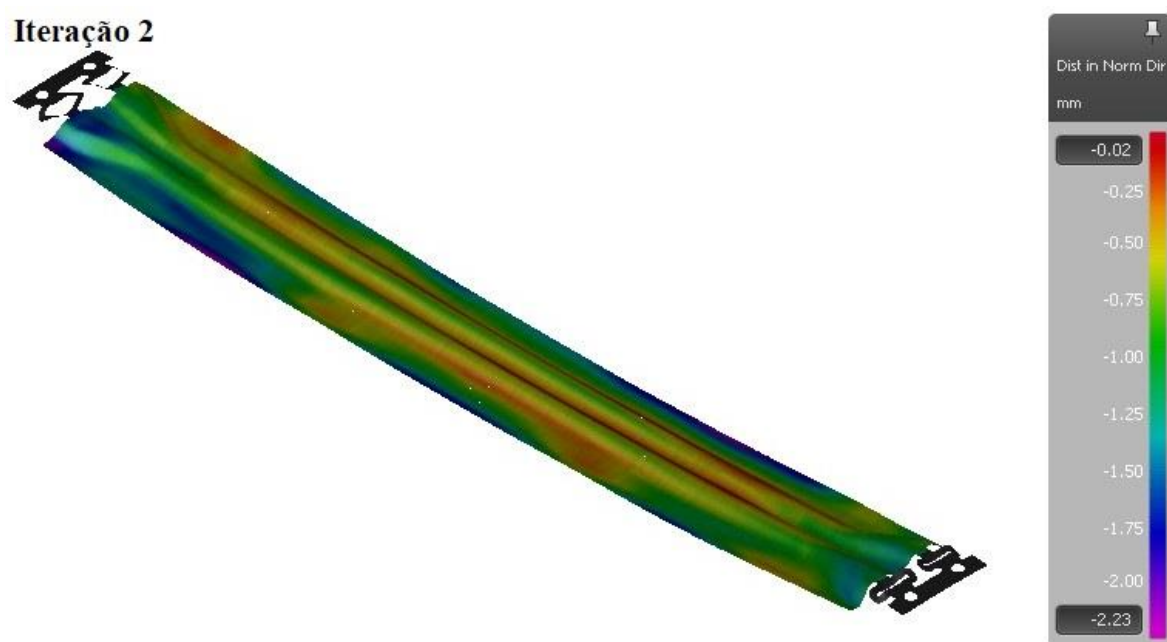


Figura 5.37 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 2

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 500 mm

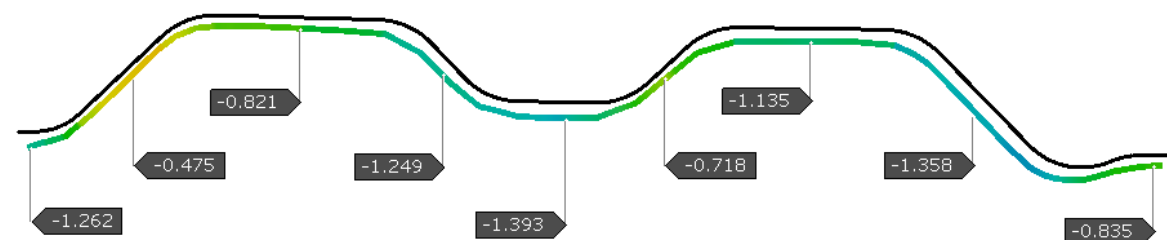


Figura 5.38 Iteração de compensação 2: Secção y = 500 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 400 mm

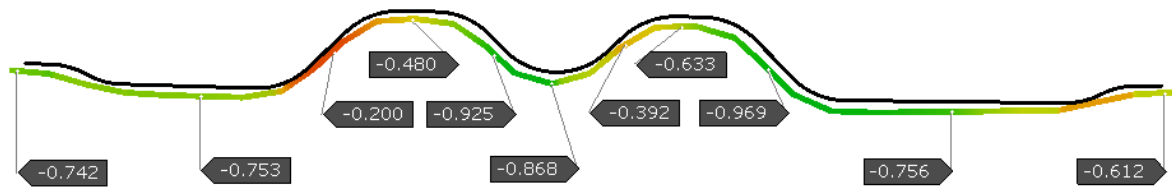


Figura 5.39 Iteração de compensação 2: Secção y = 400 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 300 mm

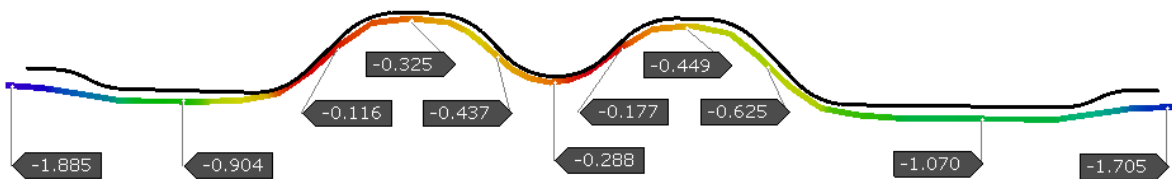


Figura 5.40 Iteração de compensação 2: Secção y = 300 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 200 mm

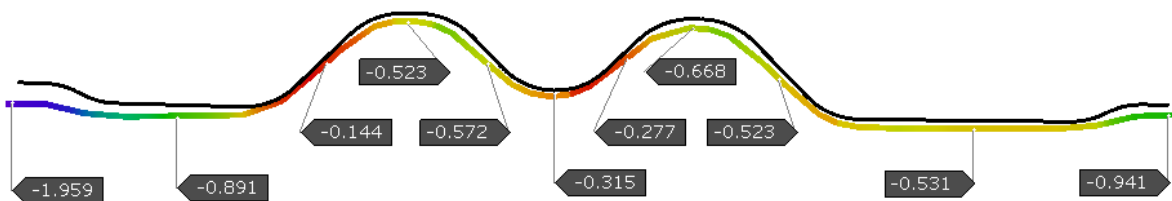


Figura 5.41 Iteração de compensação 2: Secção y = 200 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 100 mm

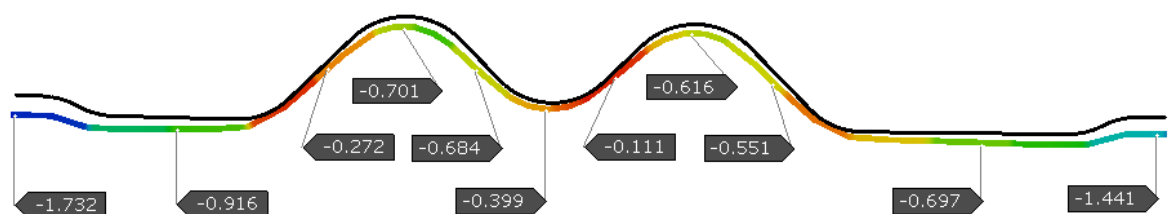


Figura 5.42 Iteração de compensação 2: Secção y = 100 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,50
Secção y = 0 mm

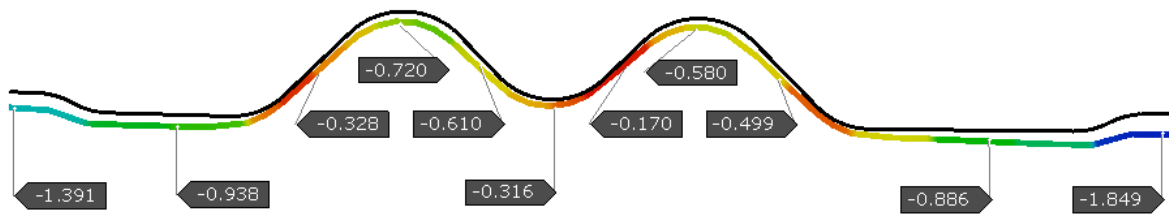


Figura 5.43 Iteração de compensação 2: Secção y = 0 mm

Analisando as figuras anteriores, é de notar uma evolução significativa dos valores de retorno elástico em todas as secções transversais da peça. Um dos maiores defeitos que se fazia notar nas simulações em que a ferramenta tinha a geometria nominal da peça – a curvatura longitudinal – está com valores melhorados, tornando a peça muito mais próxima da geometria pretendida, mas ainda assim, é um dos aspetos que tem de ser melhorado. A execução dos dois canais centrais da peça também foi melhorada e existem, inclusive, pontos onde o valor de retorno elástico já se encontra abaixo da tolerância de projeto. Nas abas laterais, o retorno elástico também reduziu bastante face aos valores iniciais, mas também é um dos aspetos que podem ser melhorados.

5.3.3 Segunda fase de iterações de compensação

Numa fase de iterações posterior à apresentada anteriormente, foram feitas simulações de compensação utilizando somente os valores que não estavam assinalados na tabela a vermelho. Nesta fase, as simulações foram realizadas fazendo variar o parâmetro CF de 0,01 entre os valores seleccionados, de maneira a que, mais uma vez, se encontrassem resultados de retorno elástico melhores. Os valores obtidos nestas iterações estão apresentados na Tabela 5.3.

Analisando os valores obtidos nesta segunda fase de iterações, e estabelecendo como critério um mínimo de redução do valor de retorno elástico obtido inicialmente de 70%, é possível concluir que ainda existem alguns valores de CF que conseguem exceder este valor, sendo o melhor resultado obtido (redução de 76,50%) com este parâmetro igual a 0,82 (**Iteração 3**) e conseguindo superar (ainda que não muito) o resultado obtido na melhor iteração anteriormente realizada (redução de 72,71%). No entanto, é interessante constatar que, em ambas as fases de simulação, existe uma tendência para que o melhor valor de retorno elástico seja conseguido com valores de CF muito próximos de 0,8. Mais uma vez, os valores que estão destacados a cor vermelha, são os que não cumprem o critério estabelecido.

Tabela 5.3 Valores obtidos na 2ª fase de iterações de compensação

<i>Compensation factor</i>	<i>Smoothing control</i>	Retorno elástico máximo [mm]	Diferença percentual [%]
0,70	0,50	2,64	-67,69%
0,71	0,50	2,63	-67,81%
0,72	0,50	2,03	-75,15%
0,73	0,50	2,50	-69,40%
0,74	0,50	1,96	-76,01%
0,75	0,50	2,38	-70,87%
0,76	0,50	2,56	-68,67%
0,77	0,50	2,49	-69,52%
0,78	0,50	2,01	-75,40%
0,79	0,50	1,97	-75,89%
0,80	0,50	2,23	-72,71%
0,81	0,50	3,14	-61,57%
0,82	0,50	1,92	-76,50%
0,83	0,50	2,58	-68,42%
0,84	0,50	2,12	-74,05%
0,85	0,50	2,35	-71,24%
0,86	0,50	2,03	-75,15%
0,87	0,50	2,21	-72,95%
0,88	0,50	3,19	-60,95%
0,89	0,50	3,00	-63,28%
0,90	0,50	2,40	-70,62%
0,91	0,50	2,47	-69,77%
0,92	0,50	3,46	-57,65%
0,93	0,50	2,75	-66,34%
0,94	0,50	3,31	-59,49%
0,95	0,50	2,62	-67,93%
0,96	0,50	3,44	-57,89%
0,97	0,50	3,66	-55,20%
0,98	0,50	2,83	-65,36%
0,99	0,50	2,69	-67,07%

Da Figura 5.44 à Figura 5.49, estão apresentadas as várias secções da ferramenta obtida na iteração com melhor valor em comparação com a geometria nominal. A comparação não será com a ferramenta de melhor de resultado obtida na fase de iterações anterior, pois as diferenças são muito pouco discrimináveis a olho, sendo muito difícil distinguir a secção de uma e outra.

Secção y = 500 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50



Figura 5.44 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 500 mm

Secção y = 400 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50



Figura 5.45 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 400 mm

Secção y = 300 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50

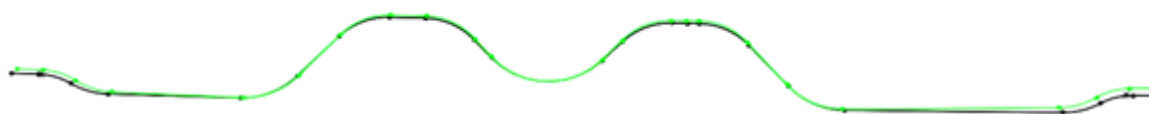


Figura 5.46 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 300 mm

Secção y = 200 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50

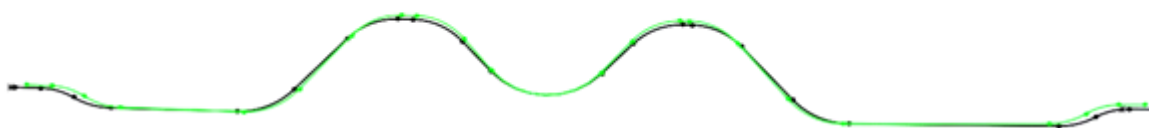


Figura 5.47 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 200 mm

Secção y = 100 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50



Figura 5.48 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 100 mm

Secção y = 0 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50



Figura 5.49 2ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm

De seguida, são apresentadas, da Figura 5.50 à Figura 5.56, as secções da peça obtida com a ferramenta da Iteração 3, com o retorno elástico discriminado em vários pontos (à semelhança das iterações anteriores).

Iteração 3

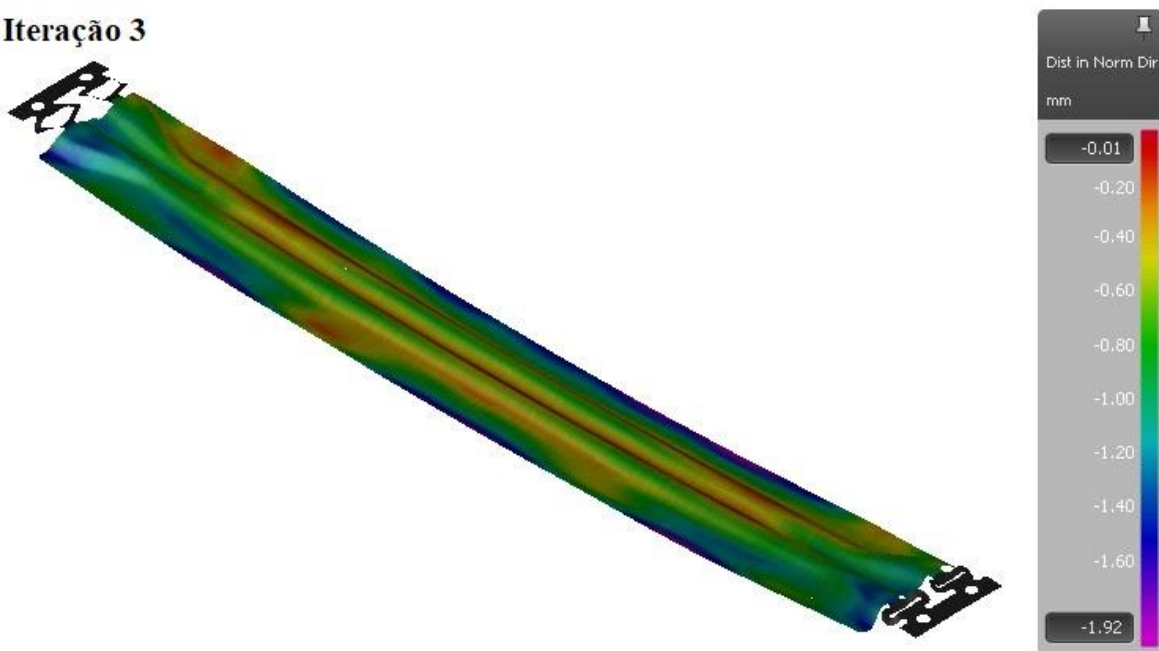


Figura 5.50 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 3

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 500 mm

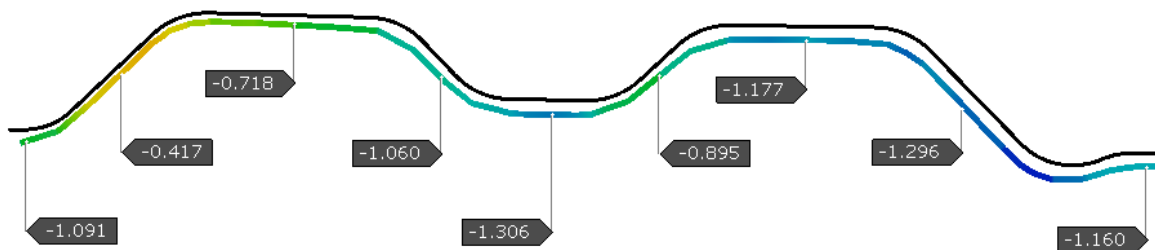


Figura 5.51 Iteração de compensação 3: Secção y = 500 mm

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 400 mm

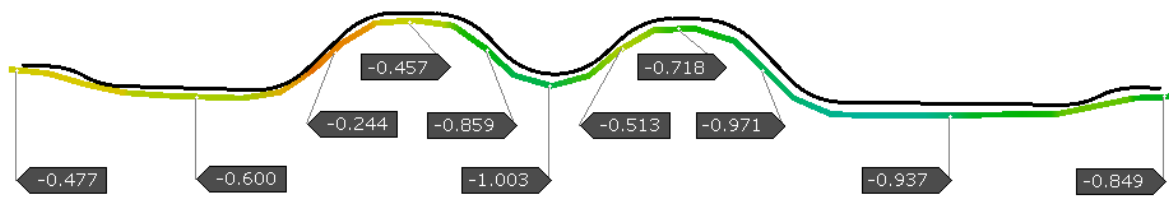


Figura 5.52 Iteração de compensação 3: Secção y = 400 mm

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 300 mm

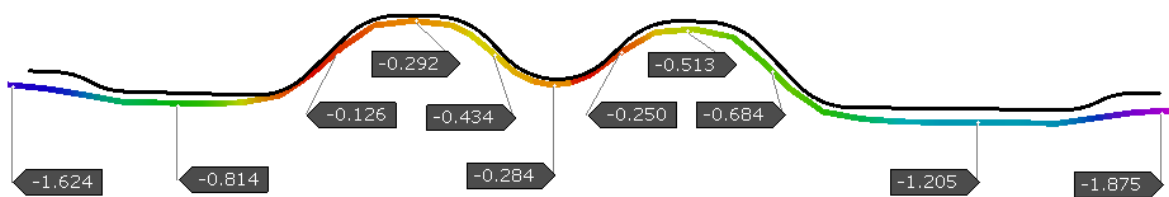


Figura 5.53 Iteração de compensação 3: Secção y = 300 mm

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 200 mm

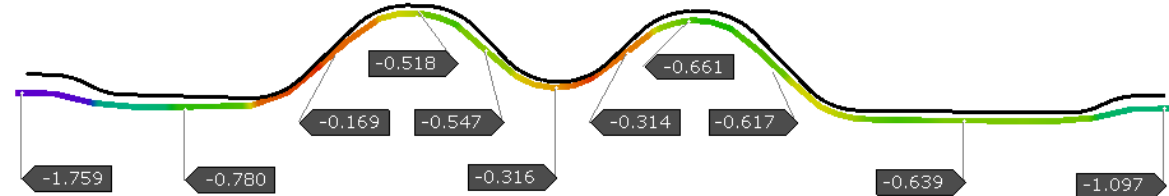


Figura 5.54 Iteração de compensação 3: Secção y = 200 mm

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 100 mm

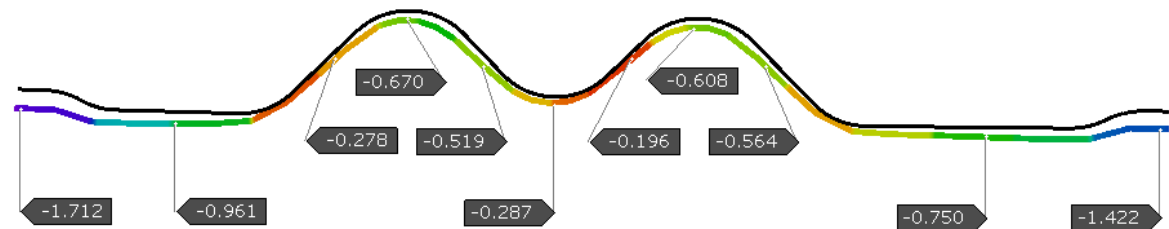


Figura 5.55 Iteração de compensação 3: Secção y = 100 mm

Iteração: CF = 0,82 SC = 0,50
Secção y = 0 mm

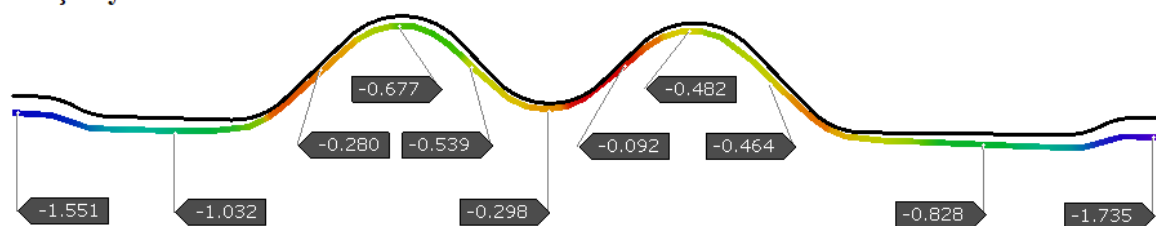


Figura 5.56 Iteração de compensação 3: Secção y = 0 mm

Observando as figuras anteriormente representadas, comparativamente aos valores da primeira fase de iterações de compensação, os aspetos que foram referidos nessa mesma fase foram ligeiramente melhorados, sendo que ainda persiste alguma dificuldade em executar corretamente as abas laterais da peça.

5.3.4 Terceira fase de iterações de compensação

Numa terceira fase de iterações, com o objetivo de melhorar os resultados obtidos nas fases anteriores, foram feitas simulações com os valores de CP que cumpriram os requisitos anteriormente estabelecidos (valor de retorno elástico com uma redução de igual ou superior a 75% do valor inicial – consultar Tabela 5.4) e foi feito variar o parâmetro SC entre 0,4 e 0,6 de modo a manter um equilíbrio entre uma superfície suavemente executada e com os devidos pormenores geométricos corrigidos.

Para esta fase, os valores apresentados na Tabela 5.5, dizem respeito apenas às iterações cujo valor de retorno elástico respetivo é pelo menos 80% menor do que o valor de retorno elástico inicial e apenas serão apresentados o melhor de cada dos CF considerados.

Tabela 5.4 Valores do parâmetro CP utilizados na 3ª fase de iterações de compensação

<i>Compensation factor</i>	<i>Smoothing control</i>	Retorno elástico máximo [mm]	Diferença percentual [%]
0,72	0,50	2,03	-75,15%
0,74	0,50	1,96	-76,01%
0,75	0,50	2,38	-70,87%
0,78	0,50	2,00	-75,40%
0,79	0,50	1,97	-75,89%
0,80	0,50	2,23	-72,71%
0,82	0,50	1,92	-76,50%
0,84	0,50	2,12	-74,05%
0,85	0,50	2,35	-71,24%
0,86	0,50	2,03	-75,15%
0,87	0,50	2,21	-72,95%
0,90	0,50	2,40	-70,62%

Tabela 5.5 Valores dos melhores resultados obtidos na 3ª fase de iterações de compensação

<i>Compensation factor</i>	<i>Smoothing control</i>	Retorno elástico máximo [mm]	Diferença percentual [%]
0,80	0,56	1,20	-85,31%
0,72	0,53	1,34	-83,60%
0,82	0,55	1,38	-83,11%
0,74	0,58	1,41	-82,74%
0,75	0,56	1,49	-81,76%
0,84	0,57	1,50	-81,64%
0,78	0,54	1,53	-81,27%

O melhor resultado obtido, teve como parâmetros CP = 0,80 e SC = 0,56 (**Iteração 4**). Tal como já havia sido destacado anteriormente e voltando-se a constatar o mesmo facto, o valor do primeiro parâmetro de compensação que obtém o melhor resultado em termos de retorno elástico para a peça do caso de estudo está próximo de 0,80 (neste caso, é igual). O valor do segundo parâmetro de compensação, assim como os de todas iterações destacadas na tabela anterior, é superior a 0,5 que, na escala de *smoothing control*, corresponde a uma compensação mais precisa do que suavizante (e termos de superfície), dando o programa mais importância a pormenores geométricos não tão facilmente executáveis. Da Figura 5.57 à Figura 5.62, estão representadas as secções da ferramenta da Iteração 4 e estas são comparadas com as secções homólogas da ferramenta da Iteração 3 e da ferramenta de geometria nominal. Nestas figuras, à semelhança do que aconteceu anteriormente, as diferenças entre as secções que correspondem às iterações são de difícil distinção, pelo facto de as mesmas terem parâmetros muito próximos e, por isso, as alterações são muito subtis e de escala muito reduzida.



Figura 5.57 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 500 mm

Secção y = 400 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50
CF = 0,80 SC = 0,56

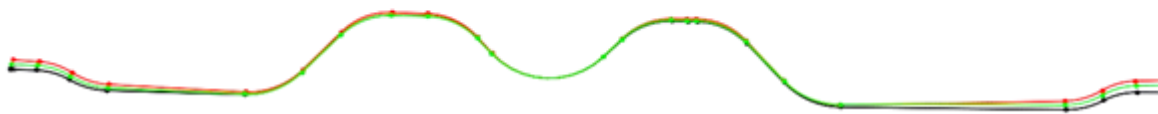


Figura 5.58 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 400 mm

Secção y = 300 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50
CF = 0,80 SC = 0,56



Figura 5.59 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 300 mm

Secção y = 200 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50
CF = 0,80 SC = 0,56

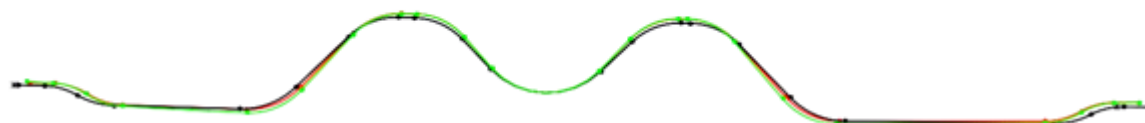


Figura 5.60 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 200 mm

Secção y = 100 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50
CF = 0,80 SC = 0,56



Figura 5.61 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 100 mm

Secção y = 0 mm

Nominal
CF = 0,82 SC = 0,50
CF = 0,80 SC = 0,56



Figura 5.62 3ª fase de iterações de compensação - Secção y = 0 mm

Em seguida, são apresentadas da Figura 5.63 à Figura 5.69 as secções da peça produzida pela ferramenta correspondente à Iteração 4 com os valores de retorno elástico nos pontos seleccionados.

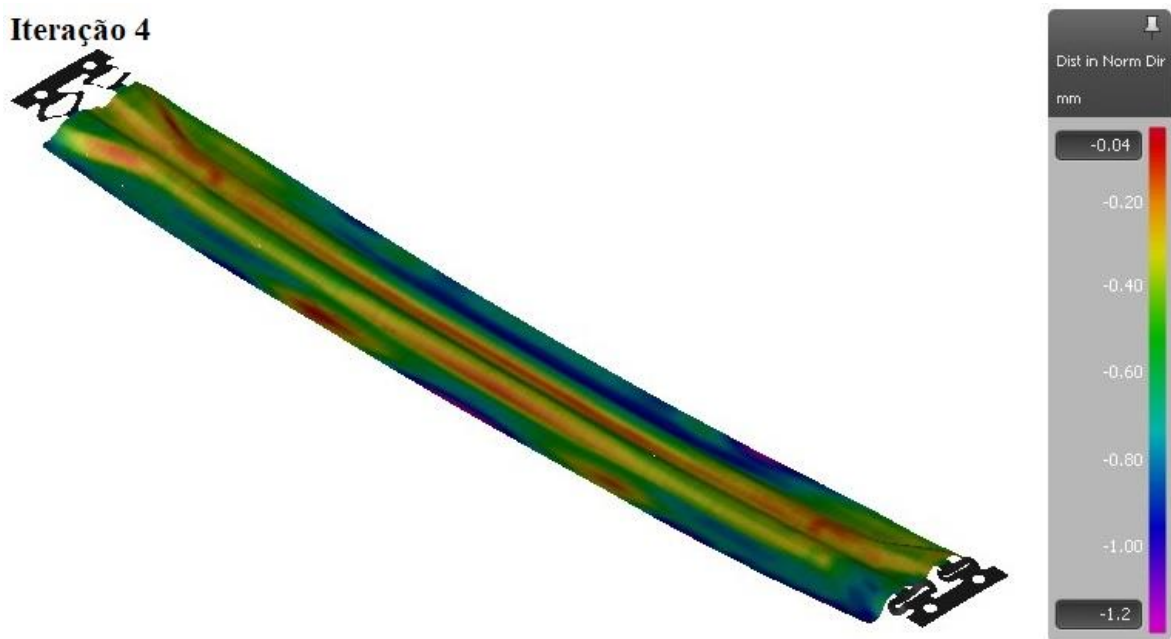


Figura 5.63 Peça do caso de estudo – Geometria da ferramenta resultante da Iteração 4

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 500 mm

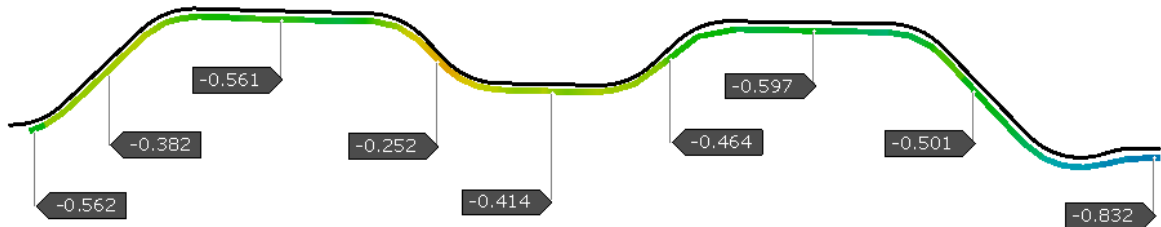


Figura 5.64 Iteração de compensação 4: Secção y = 500 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 400 mm

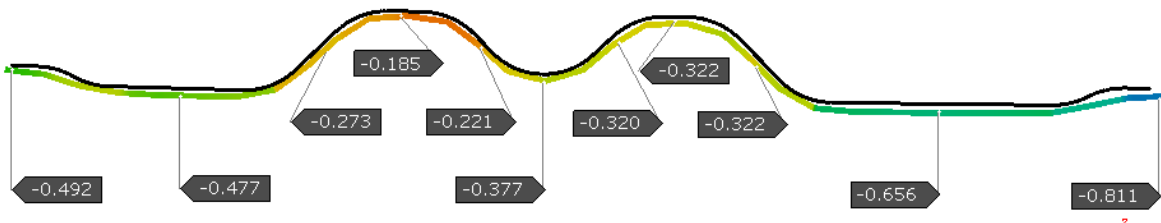


Figura 5.65 Iteração de compensação 4: Secção y = 400 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 300 mm

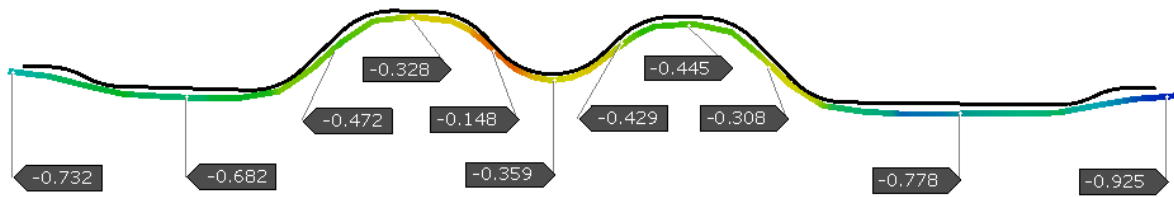


Figura 5.66 Iteração de compensação 4: Secção y = 300 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 200 mm

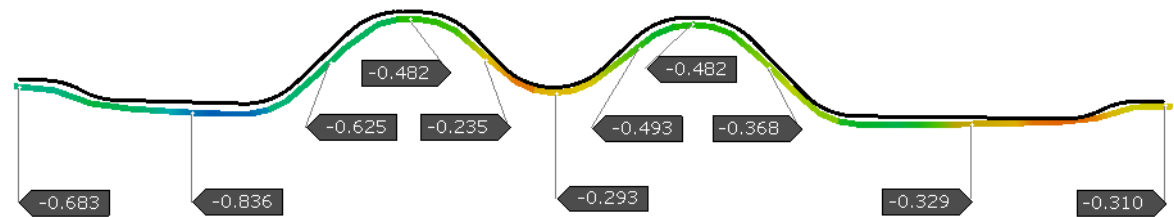


Figura 5.67 Iteração de compensação 4: Secção y = 200 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 100 mm

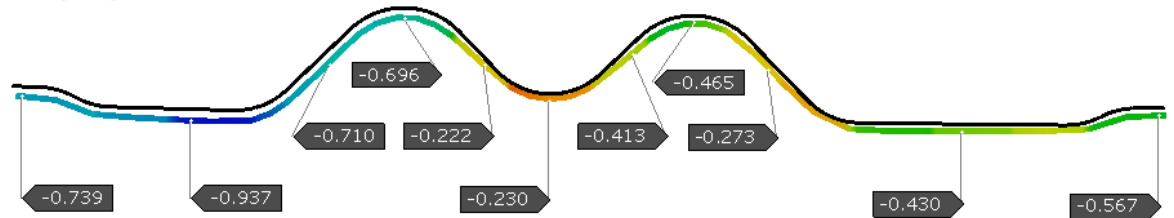


Figura 5.68 Iteração de compensação 4: Secção y = 100 mm

Iteração: CF = 0,80 SC = 0,56
Secção y = 0 mm

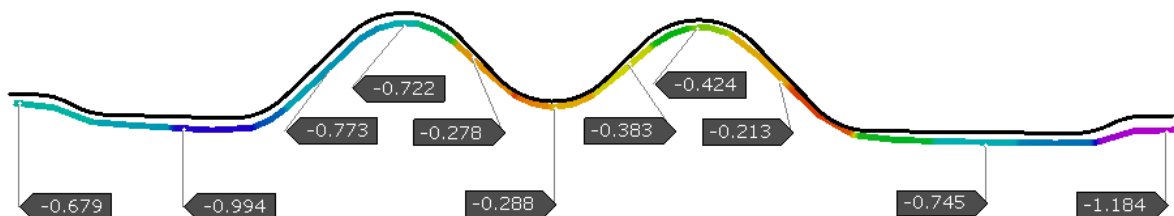


Figura 5.69 Iteração de compensação 4: Secção y = 0 mm

Visto que no módulo de compensação do programa utilizado não existe quaisquer outros fatores que possam ser modificados e conjugados entre (dentro valores aceitáveis dos mesmos), chega-se assim ao melhor resultado, obtido nas iterações de compensação da ferramenta no âmbito de melhorar os efeitos do fenómeno de retorno elástico na peça do caso de estudo, conseguindo assim uma redução de 8,17 mm (valor para ferramenta nominal) para 1,20 mm no valor máximo de retorno elástico (equivalente a uma redução superior a 85% do mesmo).

6 Análise dos resultados obtidos

6.1 Introdução

Com a presente análise pretende-se perceber as alterações que os parâmetros de compensação provocam na ferramenta e como essas alterações influenciam a execução da peça.

A análise geométrica será feita de modo a que se consigam perceber as alterações que os pormenores geométricos mais influentes (raios de curvatura e ângulos entre superfícies) vão sofrendo desde a geometria nominal, passando pela Iteração 3 e terminando na Iteração 4, em que foi obtido o melhor resultado. Esta análise é feita, em primeiro lugar, na ferramenta e depois na peça que é produzida pela mesma.

6.2 Ferramenta com geometria nominal da peça

Na Figura 6.1 está representada uma das secções transversais da geometria nominal (em cima) e parte da secção longitudinal (em baixo) com os pormenores geométricos identificados e quantificados (este modo de apresentação das secções transversal e longitudinal é mantida para as Figura 6.3 e Figura 6.5).

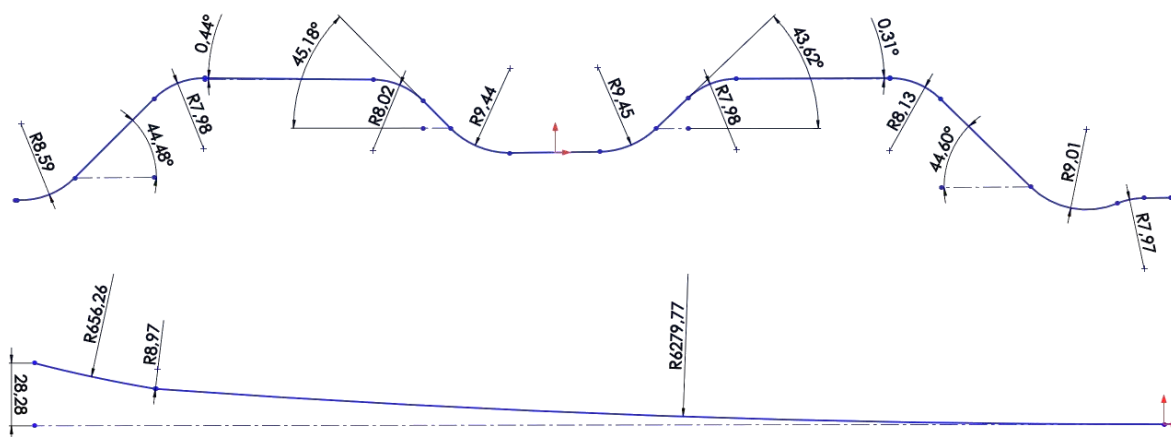


Figura 6.1 Pormenores geométricos da geometria nominal

A secção da peça produzida por esta geometria está representada na Figura 6.2 com cor azul podendo ser comparada com a geometria (a cor preta), de modo a poderem ser analisados pormenores que não estão de acordo com o pretendido.

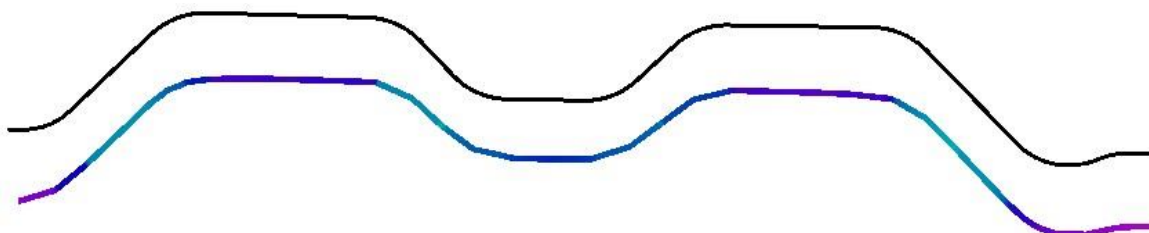


Figura 6.2 Peça produzida pela ferramenta de geometria nominal: Secção y = 500 mm

Com a chapa a ser estampada por esta ferramenta, as três principais dificuldades estão na curvatura longitudinal da peça, que na figura é evidenciada pelo facto de a curva superior (nominal) e inferior estarem bastante afastadas; a transição de um canal para o outro, no centro da peça, está bastante mais suavizada na peça do que na geometria pretendida (não se faz notar um troço reto praticamente); por fim, ambas as abas laterais estão mal executadas, não tendo a curvatura pretendida.

A solução para melhorar estes pormenores, passa por compensar a ferramenta.

6.3 Ferramenta com geometria obtida na Iteração 3

No sentido de mostrar as alterações decorrentes da compensação da geometria nominal, na Figura 6.3 está apresentada a geometria da ferramenta da Iteração 3 (nas duas curvas de baixo) e geometria nominal, de novo (nas duas curvas de cima).

Após análise de todos os valores acima destacados na secção transversal, é possível ver que na compensação todos os raios de curvatura diminuem, uns mais que outros, mas todos por volta 0,5mm, de modo a que as curvas fiquem ligeiramente mais “vincadas” na peça e, para o mesmo efeito, todos ângulos analisados aumentam entre 1° e 2°, “fechando” um pouco a zona dos canais, para que estes possam ser corrigidos. Na curvatura longitudinal da ferramenta, é possível ver que o raio de curvatura maior diminui significativamente (em cerca de 2000 mm) enquanto que o raio menor diminui cerca de 0,25 mm, por forma a fazer a extremidade da ferramenta subir e fazer uma *overbend* da chapa nessa região e compensar a recuperação da mesma. A diminuição dos raios maiores também contribui para esta alteração.

Na peça produzida na ferramenta da Iteração 3, já é possível ver que a curvatura da longitudinal está muito mais de acordo com o que é desejado, pois existe uma maior proximidade das curvas na parte inferior da figura. A superfície da peça também se encontra um pouco mais próxima do desejado, sendo que se nota uma maior curvatura (em relação à peça realizada com a ferramenta de geometria nominal) nos canais centrais da peça e abas laterais. Este, é o resultado conseguido para um *compensation factor* de 0,82 e *smoothing control* de 0,50. A Figura 6.4 mostra as alterações na peça.

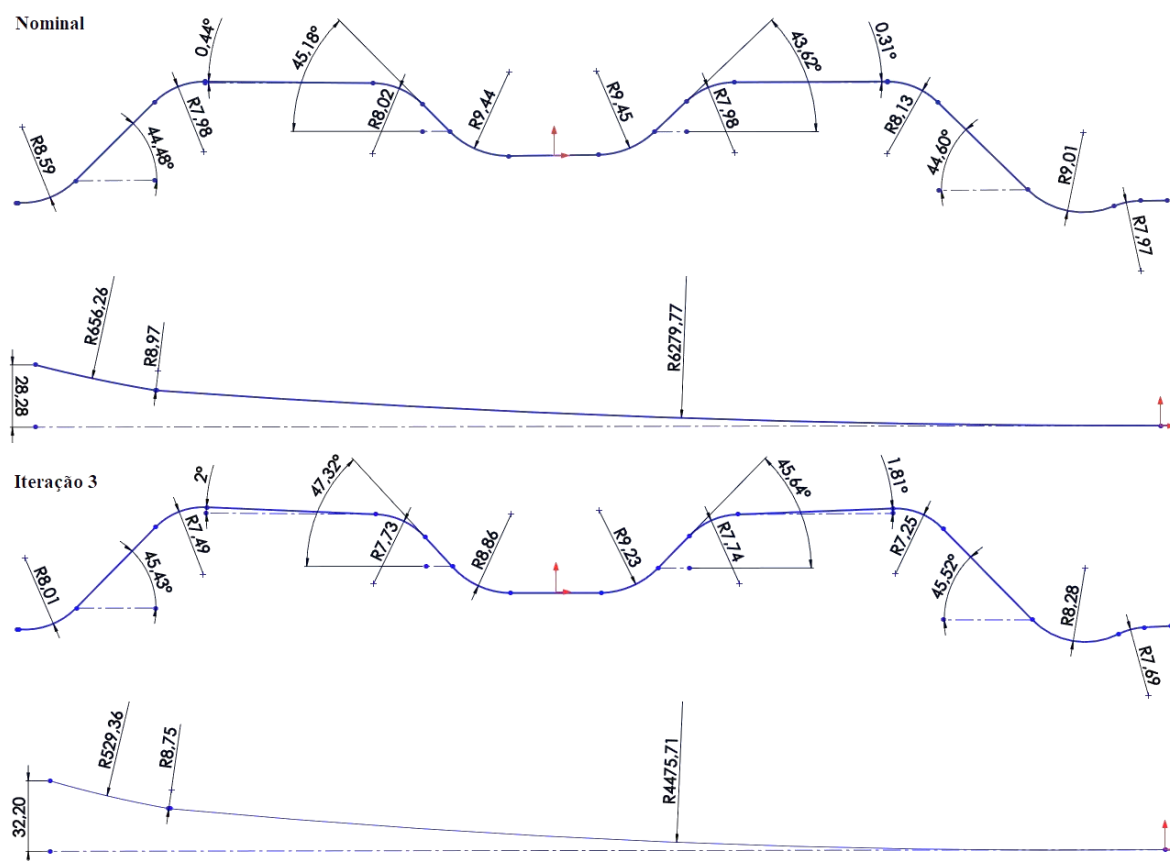


Figura 6.3 Pormenores geométricos da geometria da Iteração 3

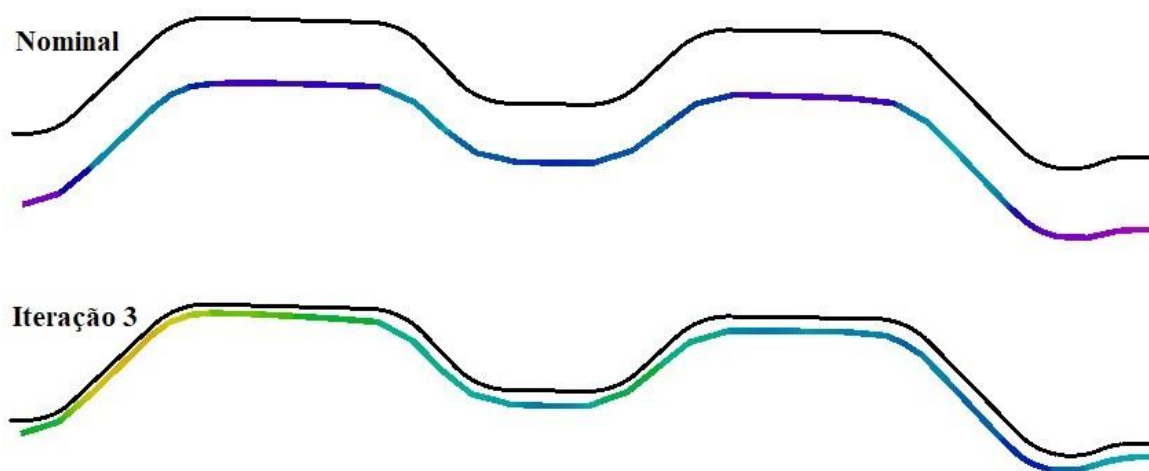


Figura 6.4 Peça produzida pela ferramenta da Iteração 3: Secção y = 500 mm

6.4 Ferramenta com geometria obtida na Iteração 4

Na Iteração 4, existem outras alterações na ferramenta e estão representadas na Figura 6.5 (duas curvas de baixo). Nesta mesma figura, estão ainda representadas as geometrias da Iteração 3 (duas curvas intermédias e a geometria nominal (duas curvas de cima)).

Nesta terceira ferramenta que produziu o melhor resultado de retorno elástico, as alterações decorrentes da aplicação dos dois parâmetros são ligeiramente diferentes: desde já, nos raios de curvatura no interior dos canais, não existe praticamente alteração da Iteração 3 para a Iteração 4, à exceção do valor do raio que se encontra mais à direita, que sofre uma alteração próxima de 0,5 mm. Nos raios de curvatura respeitantes às abas laterais, à exceção do raio mais à direita que sofre uma ligeira redução (menor que 0,1 mm), os outros sofrem um aumento em relação à Iteração 3 de cerca de 0,2 mm. Quanto aos pormenores geométricos angulares, nos que pertencem à parte superior dos canais da ferramenta, existe um aumento de cerca de $0,2^\circ$ no exterior esquerdo e de $0,5^\circ$ no direito, enquanto que os ângulos mais interiores se mantêm praticamente inalterados em relação aos valores obtidos na Iteração 3. Nos ângulos inferiores dos canais, a maior alteração está no mais à esquerda que reduz 2° em relação à Iteração 4, enquanto que no ângulo oposto existe uma redução de cerca de $0,5^\circ$. Por fim, nos ângulos menores que se encontram no topo dos canais, à direita, existe uma redução em relação à iteração anterior de cerca de $0,5^\circ$ e um aumento no mesmo valor do lado esquerdo. À semelhança do que aconteceu na Iteração 3 na curvatura longitudinal, nesta compensação, também existe uma diminuição do menor raio de curvatura, desta vez, de quase 1 mm, não alterando em muito a altura da extremidade da ferramenta, mas contribuindo para um maior vinco nessa zona da chapa, de modo a que esta seja forçada a permanecer mais próxima da geometria nominal. A ferramenta com as características analisadas produz a secção da peça que está representada na Figura 6.6.

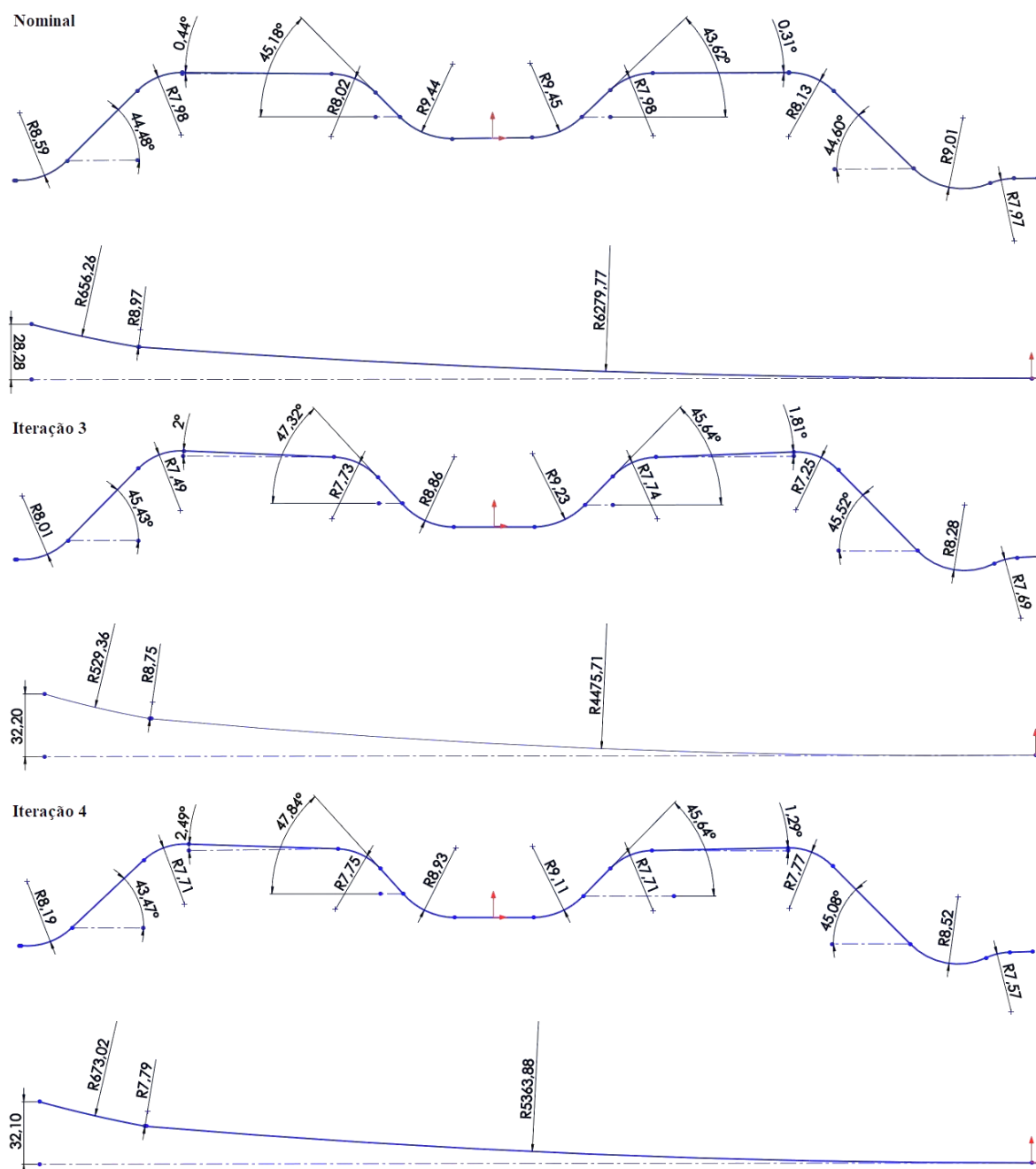


Figura 6.5 Pormenores geométricos da geometria da Iteração 4

Nota-se uma ligeira evolução da peça produzida pela ferramenta da Iteração 4 em que as abas laterais se encontram muito mais próximas da geometria desejada (ainda que haja necessidade de melhoria) e ambos os canais se encontram muito mais próximos da geometria nominal e existe uma maior aproximação do lado direito da peça à geometria pretendida (isto em relação à Iteração 3). Decorrente de outras alterações que são feitas peça, é possível também ver (através da proximidade das duas curvas) que a curvatura longitudinal da peça se encontra praticamente corrigida.

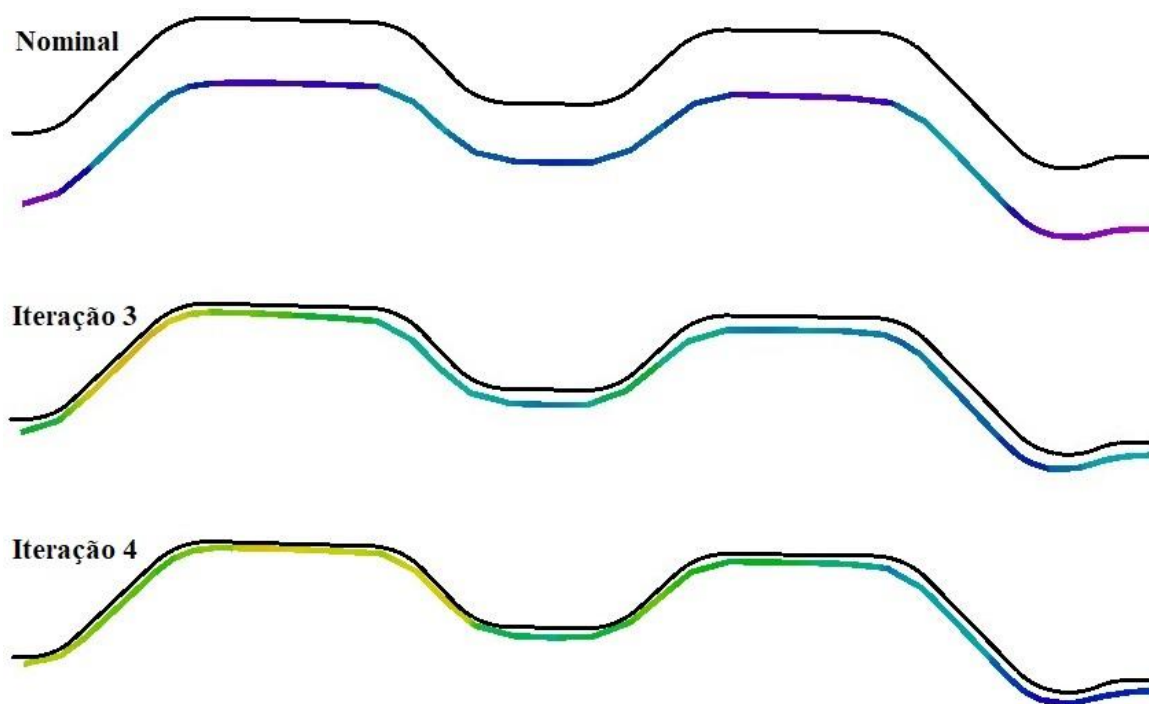


Figura 6.6 Peça produzida pela ferramenta da Iteração 4: Secção y = 500 mm

7 Conclusão

Com os resultados que foram obtidos nas iterações de compensação da ferramenta analisada no caso de estudo, existem duas análises distintas que podem ser feitas. Em primeiro lugar, a utilização deste tipo de *software* auxilia a fase inicial do processo de redução dos efeitos do retorno elástico numa peça de aço DP. Basta que seja feita uma comparação entre o resultado do retorno elástico com a ferramenta de geometria nominal e o resultado da última iteração e é possível ver que a evolução é enorme – uma redução do valor máximo de retorno elástico de 85% - havendo, assim, uma maior aproximação à geometria que é pretendida para a peça. A geometria da ferramenta cuja simulação obteve o melhor resultado pode ser exportada como ficheiro de CAD.

Ainda que os resultados apresentados ao longo destas iterações apresentem melhorias significativas nos valores de retorno elástico da peça estampada, o valor final conseguido ainda se encontra aquém do valor da tolerância considerada (o melhor resultado obtido para o valor máximo de retorno elástico nas iterações de compensação foi de 1,2 mm e a tolerância é de 0,3 mm). Assim sendo, a geometria final obtida não pode ser a geometria definitiva da ferramenta que irá produzir a peça do caso de estudo.

Contudo o pretendido era encontrar uma abordagem para auxílio do processo de compensação da ferramenta, o que foi feito através das secções.

Referências bibliográficas

- [1] "Hot Stamped Auto Parts". [Online]. Disponível em: <http://www.interlaken.com/wp-content/uploads/2015/01/Hot-Stamped-Auto-Parts.png>. [Acedido: 16-Fev-2017].
- [2] Kuziak, R., Kawalla, R. & Waengler, S., "Advanced high strength steels for automotive industry", *Archives of civil and mechanical engineering*, vol. VIII, pp. 103–117, 2008.
- [3] Azraq, A. & Suliman, S., "Numerical Simulation of Metal Sheet Plastic Deformation Processes through Finite Element Method", Doctoral dissertation, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006.
- [4] Gorni, A. A., "Aços Avançados de Alta Resistência - Microestrutura e propriedades mecânicas", *Corte e Conformação de Metais*, vol. 4, pp. 26–57, 2008.
- [5] Weiss, M., Kupke, A., Manach, P. Y., Galdos, L. & Hodgson, P. D., "On the Bauschinger effect in dual phase steel at high levels of strain", *Materials Science & Engineering: A*, vol. 643, pp. 127–136, Set. 2015.
- [6] "AHSS Guidelines". [Online]. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>. [Acedido: 02-Fev-2017].
- [7] Granbom, Y., "Structure and mechanical properties of dual phase steels - An experimental and theoretical analysis", Doctoral dissertation, KTH Industrial Engineering and Management, 2010.
- [8] Ji, D., Zhang, M., Zhu, D., Luo, S. & Li, L., "Influence of Microstructure and Pre-straining on the Bake Hardening Response for Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels of Different Grades", *Materials Science & Engineering: A*, 2017.
- [9] Rodrigues, J. & Martins, P., "Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica Vol 1: Fundamentos teóricos, 2ª edição". Escolar Editora, 2010.
- [10] Ghanei, S., Kashefi, M. & Mazinani, M., "Eddy current nondestructive evaluation of dual phase steel", *Materials and Design*, vol. 50, pp. 491–496, Set. 2013.
- [11] Schwindt, C. D., Stout, M., Iurman, L. & Signorelli, J. W., "Forming Limit Curve Determination of a DP-780 Steel Sheet", *Procedia Materials Science*, vol. 8, pp. 978–985, 2015.
- [12] "AHSS Johansson_Olsson". [Online]. Disponível em: http://www.istma.org/istma-world/ISTMA_Conferencehall/uddeholm2005/AHSS%20Johansson_Olsson.pdf. [Acedido: 05-Fev-2017].
- [13] Wick, C., Benedict, J. T. & Veilleux, R. F., "Tool and Manufacturing Engineers Handbook Vol 2: Forming". Society of manufacturing engineers, 1984.
- [14] Billur, E. & Altan, T., "Challenges in Forming Advanced High Strength Steels", *Proceedings of New Developments in Sheet Metal Forming*, pp. 285–304.
- [15] Ingarao, G., Lorenzo, R. D. & Micari, F., "Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure", *Materials & Design*, vol. 30, n. 10, pp. 4421–4433, Dez. 2009.

- [16] Pham, C. H., Thuillier, S. & Manach, P. Y. "Twisting analysis of ultra-thin metallic sheets", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 214, n. 4, pp. 844–855, Abr. 2014.
- [17] Yoshida, T., Isogai, E., Sato, K. & Hashimoto, K., "Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures", *Nippon Steel technical report.*, vol. 103, n. 4–10, 2013.
- [18] Gan, W. & Wagoner, R. H., "Die design method for sheet springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, n. 7, pp. 1097–1113, Jul. 2004.
- [19] "Sheet metal forming simulation for automotive applications - LEM3". [Online]. Disponível em: <https://www.yumpu.com/en/document/view/23595873/sheet-metal-forming-simulation-for-automotive-applications-lem3>. [Acedido: 19-Fev-2017].
- [20] "Bauschinger effect". [Online]. Disponível em: https://imagemag.ru/img-ba_bauschinger-effect.html. [Acedido: 16-Fev-2017].
- [21] Suchy, I., "Handbook of die design, 2nd ed.", New York: McGraw-Hill, 2006.
- [22] "Dual Phase steels". [Online]. Disponível em: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/ahss/dp/en>. [Acedido: 24-Abr-2017].
- [23] "High strength low alloy (HSLA) steels for cold forming". [Online]. Disponível em: <http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/HYTSS/HSLA/EN>. [Acedido: 24-Abr-2017].
- [24] "H - High strength IF steels". [Online]. Disponível em: http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/H_EN.html. [Acedido: 24-Abr-2017].
- [25] "Tata Steel - Automotive - Metallic coated - Steel for forming". [Online]. Disponível em: <https://www.tatasteeleurope.com/en/products-and-services/automotive/metallic-coated/forming>. [Acedido: 24-Abr-2017].
- [26] "Tata Steel - Automotive - Cold-rolled - Steel for forming". [Online]. Disponível em: <https://www.tatasteeleurope.com/en/products-and-services/automotive/cold-rolled/forming>. [Acedido: 24-Abr-2017].